| GOBIERNO DE COLOMBIA | FORMATO MEMORIA JUSTIFICATIVA |
|---|---|

| | |
|---|---|
| **Entidad originadora:** | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) Departamento Administrativo de la Presidencia de la República (DAPRE). |
| **Fecha (dd/mm/aa):** | 14-07-2026 |
| **Proyecto de Decreto/Resolución:** | *"Por medio de la cual se adopta el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia y se implementa su sistema de consulta"* |

## 1. ANTECEDENTES Y RAZONES DE OPORTUNIDAD Y CONVENIENCIA QUE JUSTIFICAN SU EXPEDICIÓN.

Colombia, debido a su ubicación geográfica en la zona andina y sobre el Cinturón de Fuego del Pacífico, es un país con alta actividad sísmica. A lo largo de su historia, y como consecuencia de diversos eventos catastróficos, el país ha avanzado significativamente en el conocimiento sobre la amenaza sísmica y en la gestión del riesgo de desastres.

Un hito importante en este proceso fue el terremoto de Popayán en 1983, que impulsó las primeras investigaciones formales sobre la amenaza sísmica en Colombia. En ese contexto, el entonces Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas, hoy conocido como el Servicio Geológico Colombiano - SGC) fue designado por la Presidencia de la República como la "Institución Asistente Científica" para el estudio de este sismo. Posteriormente, tras la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985, el Ingeominas asumió la responsabilidad de realizar estudios sobre los riesgos geológicos en el país, conforme a lo establecido en el Decreto 3815 de 1985. Desde entonces, esta institución ha trabajado de manera continua en la evaluación y monitoreo de amenazas geológicas, en cumplimiento de sus responsabilidades históricas.

En 2011, con la promulgación del Decreto Ley 4131, se transformó la naturaleza jurídica de Ingeominas, convirtiéndolo en el Servicio Geológico Colombiano (SGC). Esta transformación le otorgó una mayor autonomía técnica y financiera, y redirigió sus funciones hacia la investigación científica y el monitoreo de amenazas geológicas. Según el artículo 3° de dicho decreto, uno de los objetivos centrales del SGC es *"adelantar el seguimiento y monitoreo de amenazas de origen geológico"* en el territorio nacional. Además, el artículo 4° asigna al SGC una serie de funciones específicas relacionadas con la gestión de amenazas sísmicas, tales como: asesorar al Gobierno Nacional en políticas sobre amenazas y riesgos geológicos; generar y suministrar información sobre amenazas geológicas; investigar fenómenos geológicos que generen amenaza; evaluar las amenazas geológicas a nivel regional y nacional; y proponer metodologías para la evaluación de amenazas a nivel departamental y municipal. Estas funciones fundamentales consolidan el liderazgo técnico y científico del SGC en la gestión de la amenaza sísmica en Colombia.

Paralelamente, en 2012 Colombia adoptó un marco normativo robusto para la gestión del riesgo de desastres, mediante la Ley 1523 de 2012, que establece la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD). Esta ley define la *gestión del riesgo* como:

> "(...) el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere; reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas, la protección y el cuidado de los animales y al desarrollo sostenible."

En su artículo 2°, la Ley 1523 asigna responsabilidades a todas las autoridades del territorio colombiano en la ejecución de los procesos de gestión del riesgo, incluyendo el conocimiento del riesgo, dentro del marco de

sus competencias. Esto implica que las entidades públicas deben desarrollar instrumentos que permitan identificar, analizar y monitorear las amenazas y riesgos. En este contexto, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) forma parte del SNGRD, como integrante del Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo, una instancia interinstitucional encargada de orientar de manera permanente la implementación del proceso de conocimiento del riesgo (art. 20 de la Ley 1523). De forma tal que la generación de información oficial sobre la amenaza sísmica de esta institución se alinea con los objetivos de la Ley 1523, que busca fortalecer la comprensión y divulgación de los riesgos.

A lo largo de las últimas décadas, Colombia ha contado con estudios sobre amenaza sísmica que han servido de base para normativas técnicas y la planificación en diversas áreas. Un ejemplo de ello es la Ley 400 de 1997, centrada en las construcciones sismo-resistentes, que propició la elaboración de reglamentos técnicos como la NSR-98 y NSR-10, los cuales incorporaron parámetros de amenaza sísmica derivados de estudios previos. No obstante, estos parámetros requerían una actualización a la luz de los nuevos datos y avances científicos.

En los últimos años, el SGC, a través del Convenio Especial de Cooperación N°12 de 2017 suscrito entre el Servicio Geológico Colombiano y la Fundación GEM, y cuyo objeto fue “Aunar esfuerzos humanos, logísticos y financieros entre el Servicio Geológico Colombiano y la Fundación GEM con el fin de mejorar el modelo de amenaza sísmica nacional propuesto en 2016y otros actores, emprendió el desarrollo de un nuevo Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia. Este esfuerzo se orientó a reflejar el mejor y más actualizado conocimiento geológico, tectónico y sismológico disponible, con el objetivo de estimar con mayor confiabilidad las intensidades probables de movimiento del terreno en el país.

En virtud de ello, el nuevo modelo incorpora mejoras metodológicas significativas en comparación con estudios anteriores. Entre los avances más relevantes se incluyen: (i) la inclusión detallada de información geológica y tectónica en la definición de las fuentes sismogénicas; (ii) el uso de modelos probabilísticos de sismicidad suavizada para reducir la subjetividad en la zonificación de fuentes; (iii) la caracterización específica de fallas geológicas activas superficiales; (iv) la revisión de la geometría y parámetros de las zonas de subducción; y (v) la selección rigurosa de ecuaciones de atenuación que representan mejor la intensidad del movimiento sísmico observada según cada entorno tectónico. Estos avances metodológicos constituyen la base científica del modelo y garantizan una mayor confiabilidad en la representación matemática de los procesos generadores de sismicidad con influencia en el país.

La necesidad y conveniencia de formalizar este modelo mediante un decreto se justifican por varios factores. En primer lugar, contar con un Modelo Nacional de Amenaza Sísmica oficial y adoptado por el Gobierno garantiza que todas las entidades y sectores utilicen una referencia unificada y respaldada técnicamente para sus análisis de riesgo, la planificación del ordenamiento territorial, el diseño de infraestructuras y las estrategias de reducción del riesgo sísmico. Actualmente, los resultados del modelo (mapas, espectros y curvas de amenaza sísmica para distintos periodos de retorno) están disponibles públicamente a través de las herramientas web del SGC y han sido diseñados para apoyar tanto la gestión del riesgo como el diseño sismo-resistente en Colombia. Sin embargo, su formalización mediante un acto administrativo de carácter normativo proporciona seguridad jurídica sobre su uso oficial y garantizará su incorporación en los instrumentos de planificación y las decisiones de política pública relacionadas con el riesgo de desastres.

En segundo lugar, de conformidad con el artículo 3 de la Ley 2294 de 2023, uno de los ejes de transformación del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia potencia mundial de la vida” es la seguridad humana y justicia social entendidas como la “transformación de la política social para la adaptación y mitigación del riesgo, que integra la protección de la vida con la seguridad jurídica e institucional, así como la seguridad económica y social”.

En la misma vía, en el artículo 226 de la misma ley se contempla que uno de los objetivos de las políticas de investigación e innovación en ciencia y tecnología en Colombia es la gestión del riesgo de desastres mediante la articulación de las ciencias y los saberes diversos para sustentar una Colombia Potencia Mundial de la Vida.

En segundo lugar, el Plan Nacional de Desarrollo 2018–2022, "Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad" (Ley 1955 de 2019), estableció en su artículo 3, objetivos de política pública denominados pactos, dentro de los cuales se encuentran estrategias transversales relevantes para la gestión del riesgo y la producción de conocimiento, entre ellos:

> "(...)
> 4. Pacto por la sostenibilidad: producir conservando y conservar produciendo.
> 5. Pacto por la ciencia, la tecnología y la innovación: un sistema para construir el conocimiento de la Colombia del futuro.
> (...)"

En estos pactos se desarrollan líneas estratégicas como *"Colombia resiliente: conocimiento y prevención para la gestión del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático*", así como *"Desarrollo de sistemas nacionales y regionales de innovación integrados y eficaces"*, y el fortalecimiento de la *"tecnología y la investigación para el desarrollo productivo y social."*

A su vez, se da cumplimiento a las recomendaciones de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) compiladas en 2025 y 2026, garantizando la transparencia de la información geocientífica y habilitando canales digitales oficiales a través del portal único SUCOP y los visores web de consulta pública del Estado, permitiendo que la producción normativa esté sustentada en la mejor evidencia científica disponible para la salvaguarda del interés general.

Por su parte, el Servicio Geológico Colombiano frente al conocimiento de la amenaza sísmica, tiene entre sus responsabilidades la investigación y evaluación de amenazas de origen geológico que pueden afectar a municipios y departamentos del país. Así, en el cumplimiento de sus funciones, el SGC ha trabajado continuamente en el estudio de la amenaza sísmica de Colombia. Que mediante el Decreto Ley 4131 de 2011 se reorganizó el antiguo Ingeominas, transformándolo en el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y asignándole funciones clave relacionadas con las amenazas geológicas, que fundamentan la elaboración y adopción del modelo sísmico. En particular, el artículo 4° del Decreto 4131 de 2011 establece que el SGC debe, entre otras funciones: *"asesorar al Gobierno Nacional en la formulación de políticas en materia de geociencias, amenazas y riesgos geológicos"*; *"generar, compilar y suministrar información sobre amenazas geológicas"*; *"investigar fenómenos geológicos generadores de amenazas y evaluar amenazas de origen geológico con afectación regional y nacional"; "proponer, evaluar y difundir metodologías de evaluación de amenazas"*; y en general, cumplir las demás funciones asignadas en esta materia. Estas disposiciones confieren al SGC la competencia técnica para desarrollar el modelo de amenaza sísmica, posicionándose como la autoridad científica en este campo. Dado que el SGC está adscrito al Ministerio de Minas y Energía, y la política pública de riesgo involucra múltiples sectores, la adopción formal del modelo trasciende el ámbito interno del SGC.

Finalmente, desde una perspectiva práctica, la formalización de este instrumento facilita su difusión y uso por parte de las autoridades territoriales y sectoriales. Con un modelo oficial, alcaldes, gobernadores, entidades de planeación y otras instituciones podrán tomar decisiones mejor fundamentadas en áreas como el ordenamiento territorial, el diseño de obras civiles, la preparación para emergencias y la protección financiera frente a desastres, entre otros.

En resumen, la adopción del Modelo Nacional de Amenaza Sísmica está plenamente justificada por la necesidad de fortalecer el conocimiento del riesgo sísmico en Colombia —un pilar fundamental de la gestión del riesgo conforme a la Ley 1523— y por la conveniencia de contar con información estandarizada y actualizada, que contribuya a la adaptación y mitigación del riesgo mediante la integración de la protección de la vida tanto con la seguridad jurídica e institucional, como con la seguridad económica y social, la seguridad de la población y al desarrollo sostenible del país.

## 2. ÁMBITO DE APLICACIÓN Y SUJETOS A QUIENES VA DIRIGIDO

El ámbito de aplicación del presente proyecto normativo abarca todo el territorio de la República de Colombia, ya que el modelo de amenaza sísmica cubre de manera integral el país a nivel nacional. La adopción oficial del Modelo Nacional de Amenaza Sísmica está dirigida a todas las entidades e instancias involucradas en la gestión integral del riesgo sísmico, así como en la planificación territorial y urbana, a nivel nacional, departamental y municipal. En particular, serán usuarios directos de este instrumento los actores del Sistema Nacional de Gestión del riesgo de Desastres responsables de formular políticas, proyectos y planes en áreas como ordenamiento territorial, infraestructura, vivienda, desarrollo urbano y gestión del riesgo, entre otras. Para estos actores, el modelo servirá como una referencia técnico-científica,de carácter obligatorio , al momento de evaluar riesgos y tomar decisiones.

Asimismo, el decreto beneficia tanto a las y los profesionales como a los gremios técnicos (ingenieros civiles, ingenieros geotécnicos, sismólogos, urbanistas, entre otros), al proporcionarles un estándar obligatorio unificado sobre los niveles de amenaza sísmica que deben considerar en sus estudios y diseños. Además, otros actores como el sector privado (por ejemplo, empresas constructoras y aseguradoras) y la academia encontrarán en el modelo una herramienta oficial de consulta sobre la amenaza sísmica, lo que aporta certeza técnica en sus análisis de riesgo y proyectos de investigación. En resumen, el instrumento normativo está orientado a todos los actores que utilizan o generan información relacionada con el riesgo sísmico, desde entidades del Estado hasta comunidades científicas y la ciudadanía en general, garantizando que cuenten con información consistente y validada sobre la amenaza sísmica en Colombia.

Es importante señalar que, aunque el modelo de amenaza sísmica tiene implicaciones en el diseño sismo-resistente de edificaciones e infraestructuras, este decreto no se limita al ámbito de la construcción. A diferencia de la normativa derivada de la Ley 400 de 1997, que se enfoca en reglamentos técnicos de construcción sismo-resistente, el presente acto administrativo se emite en el marco de la Política Nacional de Gestión del Riesgo (Ley 1523 de 2012). Por tanto, su alcance es más amplio: abarca la planificación del desarrollo territorial, la gestión ambiental y la reducción del riesgo en general, más allá del cumplimiento de requisitos de diseño estructural. En este sentido, la adopción del modelo será un insumo clave para instrumentos como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), los Planes de Gestión del Riesgo de Desastres a todos los niveles, las estrategias de respuesta y recuperación, y otros instrumentos y decisiones de política pública orientadas a minimizar el impacto de los eventos sísmicos en la población y en su patrimonio.

Conforme a lo anterior, todas las autoridades nacionales y territoriales, en ejercicio de sus competencias en gestión del riesgo y planificación, deberán incorporar la información provista por el Modelo Nacional de Amenaza SísmicaEn conclusión, el decreto tiene un ámbito de aplicación nacional y multisectorial, y está dirigido a todos los actores interesados en la gestión del riesgo sísmico y en la toma de decisiones informadas para reducir la vulnerabilidad sísmica en Colombia.

Incluir pertinencia de creación de la comision

## 3. VIABILIDAD JURÍDICA

### 3.1 Análisis de las normas que otorgan la competencia para la expedición del proyecto normativo

El articulo 90 del la Ley 1523 del 2012, en consonancia con el numeral 11 del artículo 189 de la Constitución política de Colombia dispone la potestad del Presidente de la República para reglamentar la Gestión del riesgo de desastres. Esta habilitación legal le permite al Presidente expedir decretos reglamentarios para poner en marcha la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. El presente proyecto de decreto se inscribe dentro de esta facultad, ya que implementa uno de los instrumentos clave del proceso de conocimiento del riesgo previsto en la Ley 1523 (art. 2 y art. 4, numeral 3), los cuales incluyen la identificación y análisis de amenazas como parte integral de la gestión del riesgo. En consecuencia, existe una base jurídica sólida en la Ley 1523 de 2012 que permite al Gobierno expedir un decreto adoptando oficialmente el modelo de amenaza sísmica, fortaleciendo así el conocimiento del riesgo a nivel nacional.

Mediante el Decreto Ley 4131 de 2011 se reorganizó el antiguo Ingeominas, transformándolo en el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y asignándole funciones clave relacionadas con las amenazas geológicas, que fundamentan la elaboración y adopción del modelo sísmico. En particular, el artículo 4° del Decreto 4131 de 2011 establece que el SGC debe, entre otras funciones: *"asesorar al Gobierno Nacional en la formulación de políticas en materia de geociencias, amenazas y riesgos geológicos"*; *"generar, compilar y suministrar información sobre amenazas geológicas"*; *"investigar fenómenos geológicos generadores de amenazas y evaluar amenazas de origen geológico con afectación regional y nacional"; "proponer, evaluar y difundir metodologías de evaluación de amenazas"*; y en general, cumplir las demás funciones asignadas en esta materia. Estas disposiciones confieren al SGC la competencia técnica para desarrollar el modelo de amenaza sísmica, posicionándose como la autoridad científica en este campo. Dado que el SGC está adscrito al Ministerio de Minas y Energía, y la política pública de riesgo involucra múltiples sectores, la adopción formal del modelo trasciende el ámbito interno del SGC. Por ello, se plantea un decreto del Presidente de la República.

De igual manera, el Plan Nacional de Desarrollo 2018–2022, "Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad" (Ley 1955 de 2019), estableció en su artículo 3 los objetivos de política pública denominados *pactos*, dentro de los cuales se incluyen estrategias transversales relevantes para la gestión del riesgo y la producción de conocimiento, tales como el Pacto por la Sostenibilidad: producir conservando y conservar produciendo, y el Pacto por la Ciencia, la Tecnología y la Innovación: un sistema para construir el conocimiento de la Colombia del futuro. En estos pactos se detallan líneas estratégicas como *"Colombia resiliente: conocimiento y prevención para la gestión del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático"*, así como el *"desarrollo de sistemas nacionales y regionales de innovación integrados y eficaces"* y el fortalecimiento de la *"tecnología y la investigación para el desarrollo productivo y social"*. En esencia, el PND facultó al Gobierno para consolidar herramientas de conocimiento y prevención para la gestión del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático. Esto refuerza la viabilidad jurídica y conveniencia del decreto, ya que se apega a los lineamientos trazados por el legislador en materia de conocimiento y reducción del riesgo.

De conformidad con los artículos 3 y 11 de la Ley 1523 de 2012, que establecen los principios y los mecanismos de coordinación del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), así como con las funciones atribuidas a la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) en el artículo 4 del Decreto Ley 4147 de 2011, relacionadas con dirigir y coordinar el Sistema, fortalecer las capacidades para el conocimiento del riesgo y promover estudios e investigaciones en la materia, resulta jurídicamente procedente la creación de una Comisión Técnica Nacional Asesora para la Gestión integral del

Riesgo Sísmico, adscrita al Comité Nacional para el conocimiento del riesgo, conforme a las funciones dispuestas en el artículo 21 de la Ley 1523 de 2012.

### 3.2 Vigencia de la ley o norma reglamentada o desarrollada

La expedición del presente decreto da cumplimiento a los aspectos establecidos en la Ley 1523 de 2012, una normativa plenamente vigente desde su promulgación el 24 de abril de 2012, que no ha sido derogada ni modificada en las disposiciones que fundamentan este proyecto. En particular, la política nacional de gestión del riesgo definida por dicha ley sigue en ejecución a través del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), y sus directrices en materia de conocimiento del riesgo continúan siendo obligatorias y vigentes. En consecuencia, el decreto se basa en una ley marco vigente, lo que asegura su coherencia con el marco normativo actual.

Por otro lado, el instrumento técnico que se adopta, el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica, fue desarrollado como parte de los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo 2018–2022. Aunque dicho plan abarcó un periodo cuatrienal que ya ha concluido, las acciones y productos contemplados en él siguen en vigor y deben materializarse. La finalización e implementación del modelo, por tanto, trasciende el plazo del Plan Nacional de Desarrollo, y su formalización mediante un decreto asegura que sus beneficios perduren a lo largo del tiempo. En este sentido, no existe impedimento alguno respecto a la vigencia normativa, ya que tanto la Ley 1523 de 2012 como los lineamientos del Plan Nacional de Desarrollo 2018–2022 han cumplido con los efectos jurídicos necesarios para habilitar esta regulación.

Una vez expedido, el decreto entrará en vigor a partir de su publicación en el Diario Oficial, conforme a las disposiciones generales sobre la vigencia de los actos administrativos de carácter general. Dado que se trata de la adopción de un instrumento técnico, su vigencia será indefinida, manteniéndose en efecto hasta que una disposición posterior lo modifique o derogue expresamente. Es importante señalar que el modelo de amenaza sísmica podrá actualizarse en el futuro conforme avance el conocimiento científico.Mientras tanto, el modelo adoptado por este decreto continuará siendo la referencia oficial vigente. En resumen, el proyecto normativo se inscribe dentro de un marco legal vigente y, una vez promulgado, se constituirá como una norma de obligatorio cumplimiento dentro de su ámbito de aplicación.

### 3.3. Disposiciones derogadas, subrogadas, modificadas, adicionadas o sustituidas

El proyecto de decreto no deroga, subroga, modifica, adiciona ni sustituye de manera explícita ninguna disposición jurídica preexistente. Esto se debe a que su contenido es innovador, ya que introduce un instrumento técnico nuevo: la adopción formal del modelo de amenaza sísmica, el cual no había sido regulado previamente a este nivel. Actualmente, no existe un decreto ni una ley que haya adoptado un modelo nacional de amenaza sísmica de forma integral, por lo que este proyecto no entra en conflicto con ninguna normativa preexistente de igual o superior jerarquía.

Es importante destacar que el decreto tampoco altera ninguna disposición relacionada con la normativa de construcciones sismo-resistentes, como el Reglamento NSR-10, adoptado por el Decreto 926 de 2010 y sus modificaciones posteriores. Dichas normativas técnicas seguirán siendo plenamente vigentes en los términos en los que fueron aprobadas. El modelo de amenaza sísmica adoptado en este decreto podría ser utilizado como base para futuras revisiones de esos reglamentos, pero cualquier modificación de los mismos deberá seguir el procedimiento legal correspondiente (como es el caso de la Comisión Asesora Permanente en el caso del NSR). Así, este decreto se articula de manera armónica con la normatividad normativa sectorial existente, sin implicar su derogación ni alteración automática.

En síntesis, la expedición de este decreto no implica la eliminación ni modificación de ningún cuerpo normativo vigente. Su alcance es *estrictamente reglamentario e instrumental*, llenando un vacío en el ordenamiento jurídico al oficializar los datos científicos sobre amenaza sísmica, pero sin invadir el ámbito de otras regulaciones. Al no existir normas previas sobre la misma materia que sean contrarias a este proyecto, se descarta cualquier efecto derogatorio tácito. Por lo tanto, la entrada en vigor de esta nueva regulación no tendrá efectos de derogación, subrogación, modificación, adición ni sustitución de disposiciones legales o reglamentarias existentes.

### 3.4 Revisión y análisis de la jurisprudencia que tenga impacto o sea relevante para la expedición del proyecto normativo (órganos de cierre de cada jurisdicción)

Se ha realizado una exhaustiva búsqueda y análisis de pronunciamientos de los órganos de cierre de las distintas jurisdicciones (Corte Constitucional, Corte Suprema de Justicia, Consejo de Estado) que pudieran tener implicaciones o relación con la materia del presente decreto. Como resultado de esta revisión, no se identificaron sentencias ni decisiones judiciales que aborden específicamente la adopción de modelos de amenaza sísmica ni la obligación de formalizar información técnica y científica en este ámbito.

En particular, no existen precedentes jurisprudenciales que limiten o condicionen la facultad del Ejecutivo para reglamentar aspectos técnicos relacionados con la gestión del riesgo, conforme a lo dispuesto en la Ley 1523 de 2012. Tampoco se encontraron fallos que cuestionen la validez de los estudios oficiales de amenaza natural ni su incorporación en los procesos de planificación pública. La ausencia de litigios o controversias judiciales sobre este tema sugiere que la iniciativa regulatoria se desarrolla en un terreno jurídicamente consolidado y sin obstáculos relevantes.

Adicionalmente, dado que el decreto se limita a establecer lineamientos técnicos y ofrecer información oficial a las entidades y al público en general, no se observa ninguna vulneración de derechos fundamentales que haya sido objeto de controversia judicial. Por ejemplo, no se afecta el derecho a la propiedad ni se imponen cargas a los particulares que pudieran haber sido objeto de tutela o demandas. Al contrario, la medida busca proteger derechos colectivos, como el derecho a un ambiente seguro y la seguridad pública, proporcionando información que contribuye a la prevención de desastres. Esta finalidad está en línea con el interés general que persigue la gestión del riesgo.

En conclusión, no existe jurisprudencia adversa ni condicionante que afecte la validez del proyecto normativo de adopción del modelo de amenaza sísmica. El decreto se sustenta plenamente en el marco legal vigente y no entra en contradicción con ninguna doctrina judicial relevante. Esto asegura que su expedición no enfrenta riesgos de ilegalidad por este concepto, y en caso de eventuales controles (como un posible control de legalidad ante el Consejo de Estado), se dispone de sólidos argumentos de competencia y necesidad pública para su defensa.

### 3.5 Circunstancias jurídicas adicionales

En cuanto a otros aspectos jurídicos relevantes, es importante señalar que la naturaleza del presente decreto, que consiste en la adopción de un instrumento técnico y científico de uso general, no requiere trámites especiales de consulta previa con comunidades étnicas u otros grupos poblacionales específicos. De acuerdo con la legislación colombiana, en particular la Ley 21 de 1991, que aprobó el Convenio 169 de la OIT, la consulta previa es obligatoria solo cuando una medida legislativa o administrativa afecta directamente los derechos colectivos de comunidades indígenas o afrodescendientes. En este caso, el decreto se limita a poner a disposición del público información sobre la amenaza sísmica y orientar su utilización por parte de las autoridades competentes. No establece usos específicos del suelo ni interviene de manera diferenciada en territorios étnicos, por lo que no genera una afectación directa a dichas comunidades que justifique un

proceso de consulta previa. Esta interpretación está alineada con la práctica administrativa: por ejemplo, en el caso de la resolución emitida por el SGC sobre el modelo de amenaza sísmica, se concluyó que no era necesario un proceso de consulta previa, dado que el acto no afectaba negativamente a comunidades indígenas o a minorías reconocidas.

Por otro lado, no se identifican impactos en términos de competencia económica o técnica que requieran trámites ante autoridades especiales. El decreto no impone estándares técnicos obligatorios para la producción o comercialización de bienes o servicios, ni establece barreras a la libre competencia; su objetivo es proporcionar información para la gestión pública en el ámbito de la gestión del riesgo sísmico. En consecuencia, no se activa la obligación de obtener un concepto previo de la Superintendencia de Industria y Comercio en materia de regulación técnica, ni se requiere notificación a la Organización Mundial del Comercio (OMC) según lo dispuesto en el Decreto Único 1595 de 2015 sobre reglamentos técnicos. El modelo de amenaza sísmica adoptado por el decreto es un insumo científico, no un reglamento técnico que regule productos comerciales, por lo que estos procedimientos no son necesarios.

Es importante destacar que la adopción del modelo de amenaza sísmica no contraviene la Ley 400 de 1997 (Ley de Construcciones Sismo-Resistentes). Por el contrario, complementa sus objetivos desde la perspectiva del conocimiento de la amenaza sísmica. La Ley 400 y su reglamento (NSR-10) se enfocan en la seguridad de las edificaciones, estableciendo criterios de diseño para resistir sismos. Dichos criterios se apoyan en coeficientes sísmicos derivados de estudios de amenaza sísmica previos. En este sentido, el nuevo modelo oficial proporcionará información actualizada que podrá ser utilizada en futuras revisiones de la norma de construcción, aunque sin modificar directamente este reglamento, ya que la competencia para actualizar el Reglamento NSR recae en la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo-Resistentes y el Ministerio de Vivienda (de acuerdo con la Ley 400). El presente decreto, en cambio, se fundamenta en la Ley 1523 de 2012, cuyo objetivo principal es dotar al país de un instrumento de conocimiento del riesgo sísmico de alcance general. Por ello, su expedición es jurídicamente autónoma y complementaria a la normativa de edificaciones, evitando solapamientos de competencias.

Por consiguiente, la adopción de este instrumento encuentra su nexo causal exclusivo en los mandatos de la Ley 1523 de 2012 (Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres). El Modelo Nacional de Amenaza Sísmica constituye una herramienta oficial del proceso de Conocimiento del Riesgo (artículos 2°, 4° y 20° de la Ley 1523), concebida para orientar las decisiones públicas del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) que trascienden el diseño de edificaciones y se fundamenta sólidamente en el principio de Precaución y de Protección de la Ley 1523 de 2012, proveyendo la mejor información técnico-científica oficial para que el Estado actúe de manera preventiva en salvaguarda de la vida de la población y la resiliencia del territorio.

Que el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica ha sido difundido en múltiples escenarios técnicos y académicos como las Jornadas de Amenaza y Riesgo Sísmico en 2018[1], la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes en 2019[2], en el Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica realiza en Cali en 2019[3], entre muchos otros; ha sido socializado a entidades públicas; y ha sido revisado y discutido en detalle por comités de la Sociedad Colombiana de Ingenieros y de la Sociedad Colombiana de Geotecnia.
Que debido a su rigurosidad técnica y científica, y su significancia para el país, el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica fue galardonado con el premio Lorenzo Codazzi[4] otorgado por la Sociedad Colombiana de Ingenieros en el año 2020.

---

[1] https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Servicio-Geol%C3%B3gico-Colombiano-realiza-jornadas-de-amenaza-y-riesgo-s%C3%ADsmico.aspx
[2] https://www.asosismica.org.co/wp-content/uploads/2019/10/Acta-157-CAP-DEFINITIVA-FDO.pdf

[3] https://asosismica.org.co/wp-content/uploads/2024/05/2019_Memorias_IX-CNIS.pdf
[4] https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Modelo-Nacional-de-Amenaza-Sismica-del-SGC-gana-premio-Codazzi-2020.aspx

## 4. IMPACTO ECONÓMICO

La adopción del Modelo Nacional de Amenaza Sísmica mediante este decreto no implica costos directos ni cargas económicas para la comunidad ni para los distintos actores involucrados o destinatarios del modelo. El modelo ya ha sido implementado técnicamente a través de la página web del Servicio Geológico Colombiano (SGC), donde está disponible de manera libre y gratuita para todos los interesados. El acceso a esta información no está sujeto a ningún tipo de tasa o cobro, lo que permite a los usuarios –ya sean entidades públicas, empresas o ciudadanos– consultar y utilizar los datos sobre amenaza sísmica sin incurrir en gastos adicionales. En este sentido, el impacto económico directo es nulo o prácticamente inexistente.

Además, el decreto no impone la obligación de cumplir con requisitos que generen inversiones obligatorias ni gastos adicionales por parte de particulares o instituciones. Es decir, no se exige la adecuación de infraestructuras, la adquisición de equipos, la contratación de personal ni la realización de actuaciones que impliquen erogaciones financieras debido a la implementación del modelo. La única obligación que se establece es que las entidades deben tener en cuenta la información oficial sobre amenaza sísmica en sus procesos de planificación y gestión.. La formalización de este proceso implica un ajuste en la fuente de datos consultada, pasando a ser la fuente oficial.

En cuanto a las externalidades económicas positivas, aunque son difíciles de cuantificar a corto plazo, es importante destacar que contar con información sísmica confiable y oficial puede generar ahorros y mitigación de pérdidas a largo plazo. Las decisiones de inversión pública informadas por un adecuado conocimiento de la amenaza sísmica contribuirán a la gestión del riesgo del país.Además, contribuirá a la protección financiera del país, promoviendo la cultura del aseguramiento contra desastres, lo que contribuiría a la resiliencia económica del país.

En conclusión, desde la perspectiva de costos y beneficios, el decreto no genera costos directos y tiene efectos económicos indirectos claramente positivos. No implica nuevos gastos para el erario ni para los administrados y, por el contrario, facilita el acceso a información técnica oficial que puede optimizar la inversión en la reducción del riesgo. En resumen, el impacto económico del proyecto normativo es positivo o neutro, alineándose con los principios de eficiencia y eficacia en la acción estatal.

## 5. VIABILIDAD O DISPONIBILIDAD PRESUPUESTAL

La implementación del presente decreto no requiere asignaciones presupuestales adicionales del Tesoro Público ni genera nuevos gastos para las entidades involucradas, ya que se apoya en recursos y capacidades ya existentes. El Servicio Geológico Colombiano (SGC), como entidad técnica responsable, dispone de la

infraestructura tecnológica necesaria para alojar y difundir el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica, plataforma que ha estado operativa desde la fase preliminar de divulgación del estudio. Este portal web y los sistemas de información geográfica asociados fueron desarrollados con recursos propios del SGC y mediante convenios de cooperación previos (como con el Global Earthquake Model - GEM), por lo que no se prevé la necesidad de inversiones adicionales para su mantenimiento en el corto y mediano plazo.

En cuanto al talento humano, el SGC ya cuenta con un equipo técnico especializado (compuesto por sismólogos, geólogos e ingenieros) encargado de dar seguimiento y actualizar la información sísmica del país, en cumplimiento de sus funciones misionales. Este equipo continuará operando el sistema de consulta y brindando asesorías relacionadas con el modelo sin necesidad de ampliar la planta de personal ni contratar servicios externos adicionales a los ya existentes. Los recursos humanos, técnicos y financieros actuales del SGC son suficientes para asegurar una gestión adecuada del modelo. LaUnidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) tienen áreas técnicas que integrarán el uso de la información dentro de sus actividades habituales, sin requerir asignaciones presupuestales adicionales.

Cabe resaltar que el decreto en sí mismo no implica la ejecución de proyectos físicos ni la adquisición de activos que requieran financiación. Su naturaleza es normativa e informativa. En caso de que, en el futuro, se identifique la necesidad de mejorar o actualizar el modelo (por ejemplo, incorporando nuevas estaciones sismológicas, estudios de microzonificación u otros avances científicos), estas acciones se realizarían dentro de los planes y presupuestos de inversión ya previstos por el SGC y otras entidades del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), o bien se gestionarían a través de mecanismos de cooperación internacional, como ha sido el caso hasta ahora.

Por lo tanto, la viabilidad presupuestal del proyecto está asegurada. No es necesario realizar modificaciones a la Ley Anual de Presupuesto ni al Marco Fiscal de Mediano Plazo. Las entidades implicadas han confirmado que cuentan con los recursos necesarios para llevar a cabo las actividades derivadas de este decreto dentro de sus apropiaciones actuales. Esta disponibilidad de recursos internos garantiza que la implementación del modelo será sostenible a largo plazo, sin generar presiones fiscales ni comprometer otras iniciativas gubernamentales. En resumen, el proyecto normativo es completamente viable desde el punto de vista financiero y presupuestal, apoyándose en infraestructura y financiación ya establecidas.

## 6. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL O SOBRE EL PATRIMONIO CULTURAL DE LA NACIÓN

El proyecto de decreto que adopta el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica tiene una naturaleza principalmente informativa y regulatoria, por lo que no genera impactos negativos directos sobre el medio ambiente ni sobre el patrimonio cultural. Al no implicar obras físicas, intervenciones en el territorio ni modificaciones inmediatas en el uso del suelo, la medida en sí misma carece de efectos adversos sobre el entorno. Más bien, su propósito es proporcionar una herramienta que facilite la planificación territorial segura y ambientalmente sostenible, lo que podría considerarse un impacto positivo indirecto.

De hecho, contar con información precisa sobre la amenaza sísmica contribuye a que las autoridades ambientales y de ordenamiento territorial prevengan desarrollos inadecuados en áreas de alta amenaza sísmica. Esto contribuye a la protección de ecosistemas sensibles y reduce la probabilidad de desastres naturales que puedan generar contaminación o daños ambientales.

En lo que respecta al patrimonio cultural, el impacto es igualmente positivo. El decreto no implica intervenciones sobre bienes de interés cultural ni afecta inmuebles patrimoniales. Por el contrario, al proporcionar información sobre las zonas de amenaza sísmica, el modelo puede contribuir a la identificación

y priorización de dichos bienes, con fines de evaluación de vulnerabilidad sísmica y de mitigación del riesgo. Este tipo de medidas contribuye a la conservación del patrimonio cultural frente a eventos sísmicos, lo que genera un impacto favorable en su preservación.

La evaluación previa realizada confirma que no existe ninguna afectación directa al medio ambiente o al patrimonio cultural como consecuencia de la adopción del modelo de amenaza sísmica. No se generan emisiones contaminantes, no hay vertimientos ni se ocupan áreas protegidas, y no se altera ni remueve el patrimonio arqueológico o arquitectónico.

En conclusión, el impacto del proyecto sobre el medio ambiente y el patrimonio cultural es neutro o incluso beneficioso. La implementación del modelo, como herramienta de consulta para autoridades y otros actores interesados en la gestión territorial, se realiza dentro del marco del conocimiento científico disponible, sin generar deterioro ambiental o cultural. Al contrario, al ofrecer información que facilita la toma de decisiones informadas, el modelo puede contribuir a la conservación del entorno natural y cultural, al promover un desarrollo territorial que considere adecuadamente las amenazas sísmicas en beneficio de la seguridad de las comunidades y la preservación de su patrimonio.

## 7. ESTUDIOS TÉCNICOS QUE SUSTENTEN EL PROYECTO NORMATIVO

El proyecto normativo se fundamenta en un trabajo técnico-científico de alta calidad, desarrollado, validado y divulgado a lo largo de los últimos años por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en colaboración con expertos nacionales e internacionales. El estudio principal que sustenta este decreto es el documento titulado *Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia*, publicado en 2020 por el SGC con el apoyo de la Fundación Global Earthquake Model (GEM). Este informe técnico final contiene la metodología utilizada, las fuentes sismogénicas consideradas, los datos empleados (como el catálogo sísmico, la información geológica, los parámetros de atenuación, etc.), los resultados obtenidos (incluidos los mapas de amenaza sísmica que muestran las aceleraciones espectrales esperadas para diferentes períodos de retorno) y las implicaciones y recomendaciones derivadas de estos resultados.

El desarrollo del modelo fue un proceso riguroso y participativo que comenzó en 2016, cuando el SGC inició la formulación de un modelo probabilístico de amenaza sísmica actualizado. Este proceso incorporó lecciones aprendidas de estudios previos, como el mapa de amenaza utilizado en el Reglamento NSR-10 y el Estudio General de Amenaza Sísmica de 2009 de la Asociación colombiana de ingeniería sísmica (AIS), al tiempo que integró los avances más recientes en el análisis de la amenaza sísmica. En mayo de 2017, el SGC presentó los primeros resultados preliminares en el Foro *"Nueva Evaluación de la Amenaza Sísmica de Colombia: Método y Resultados 2017"*, realizado en Bogotá. Este evento contó con la participación de más de 160 representantes de entidades públicas (como la Presidencia de la República, ministerios, DNP, entre otros), gremios de ingeniería (Sociedad Colombiana de Ingenieros, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, Sociedad Colombiana de Geotecnia, entre otros), la academia y expertos internacionales. El foro permitió someter a revisión pública la metodología y los hallazgos iniciales, recogiendo valiosas observaciones y necesidades de los distintos grupos de interés.

Posteriormente, el SGC publicó los resultados preliminares y los mapas del modelo en su geoportal web para consulta pública, dando inicio a un período de retroalimentación. En octubre de 2017, se realizó una *Mesa Técnica de Discusión* convocada por el SGC, donde participaron usuarios expertos de diversas instituciones (DNP, universidades, AIS, ingenieros consultores, entre otros). Durante esta mesa, se identificaron alcances, limitaciones e implicaciones del modelo, y se recopilaron recomendaciones técnicas, como la necesidad de

considerar períodos de retorno adicionales y ajustar las ecuaciones de atenuación para ciertos intervalos de vibración. Con base en estos aportes, el SGC elaboró una versión consolidada y mejorada del modelo nacional de amenaza sísmica.

Los nuevos resultados consolidados fueron presentados y discutidos en diversos eventos especializados durante 2018, como las *Jornadas de Evaluación de Amenaza y Riesgo Sísmico 2018* (febrero de 2018 en Bogotá, organizadas junto con la Fundación GEM), en las cuales se discutieron los avances y se presentó el foro *"De la amenaza sísmica al diseño sismo-resistente"*, con participación de conferencistas internacionales y más de 60 especialistas nacionales. Estos resultados también fueron divulgados en eventos como el Congreso Colombiano de Geología de 2017, las Jornadas Geotécnicas y Estructurales de la Sociedad Colombiana de Ingenieros en 2018, y en la *Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo-Resistentes (CAP)* en agosto de 2018, lo que asegura que los encargados de la normativa de construcciones estuvieran plenamente informados. La amplia difusión y discusión en estos foros técnicos evidencia que el modelo cuenta con el respaldo de un consenso considerable dentro de la comunidad científica y de ingeniería.

Además del informe técnico final, el SGC ha puesto a disposición un *Sistema de Consulta de la Amenaza Sísmica de Colombia* en línea, que permite visualizar y descargar los resultados del modelo. Este sistema incluye mapas interactivos de amenaza en roca firme para todo el país, curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme para períodos de retorno de 31, 225, 475, 975 y 2475 años, entre otros, y para diferentes períodos de vibración (0.0 s, 0.2 s, 1.0 s). También se ha proporcionado información desagregada por cabecera municipal y centro poblado, conforme al Marco Geoestadístico Nacional del DANE, lo que facilita que cada localidad pueda conocer los resultados del modelo en su jurisdicción. Toda esta información técnica está estructurada para ser utilizada como insumo directo en análisis de riesgo y en la toma de decisiones a nivel nacional y territorial.

En resumen, el sustento técnico-científico del proyecto normativo es robusto, transparente y ampliamente validado. El *Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia*, elaborado por el SGC con el apoyo de expertos de la comunidad científica, representa la mejor síntesis del conocimiento disponible sobre la amenaza sísmica en el país. La adopción del modelo mediante este decreto se basa en un cuerpo de evidencia técnica sólido, documentado en publicaciones formales y validado a través de múltiples espacios de socialización y retroalimentación.

| **ANEXOS:** | |
|---|---|
| Certificación de cumplimiento de requisitos de consulta, publicidad y de incorporación en la agenda regulatoria<br>*(Firmada por el servidor público competente –entidad originadora)* | *En consulta* |
| Concepto(s) de Ministerio de Comercio, Industria y Turismo<br>*(Cuando se trate de un proyecto de reglamento técnico o de procedimientos de evaluación de conformidad)* | *No aplica* |
| Informe de observaciones y respuestas<br>*(Análisis del informe con la evaluación de las observaciones de los ciudadanos y grupos de interés sobre el proyecto normativo)* | *En consulta* |

| | |
|---|---|
| Concepto de Abogacía de la Competencia de la Superintendencia de Industria y Comercio<br>*(Cuando los proyectos normativos tengan incidencia en la libre competencia de los mercados)* | *No aplica* |
| Concepto de aprobación nuevos trámites del Departamento Administrativo de la Función Pública<br>*(Cuando el proyecto normativo adopte o modifique un trámite)* | |
| Otro<br>*(Cualquier otro aspecto que la entidad originadora de la norma considere relevante o de importancia)* | *Modelo Nacional de amenaza sísmica y demás documentos relacionados en el capítulo de estudios técnicos* |

**Aprobó:**

_____

**Elaboracion**
**Aprobación**

**Jorge Alejandro Maldonado**

**Nombre y firma del Jefe de la Oficina Jurídica entidad originadora o dependencia que haga sus veces**

**Nombre y firma del (los) servidor(es) público(s) responsables en la entidad cabeza del sector administrativo que lidera el proyecto normativo**

**Nombre y firma del (los) servidor(es) público(s) responsables de otras entidades**

F.O. 32/2016

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO

Conocimiento Geocientífico 100 años 1916 - 2016

MINMINAS

TODOS POR UN NUEVO PAÍS

**CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN No. 27 DE 2016**

| | |
|---|---|
| **OBJETO:** | AUNAR ESFUERZOS HUMANOS, LOGÍSTICOS Y FINANCIEROS ENTRE EL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO Y LA FUNDACIÓN GEM CON EL FIN DE GENERAR "UN NUEVO MODELO DE AMENAZA SÍSMICA NACIONAL PARA COLOMBIA". |
| **VALOR APORTES:** | CUARENTA MIL EUROS ($40,000€) |
| **PLAZO:** | HASTA EL 31 DE DICIEMBRE DE 2016. |

Entre los suscritos, el **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**, Instituto Científico y Técnico, con personería jurídica, autonomía administrativa, técnica financiera y patrimonio independiente adscrito al Ministerio de Minas y Energía y reconocido por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS como Centro de Investigación mediante la Resolución No. 1057 del 02 de diciembre de 2014, representado en este acto por **OSCAR ELADIO PAREDES ZAPATA**, mayor de edad, identificado con cédula de ciudadanía Nº 19'222.410 de Bogotá, quien actúa en su condición de Director General, en virtud del Decreto de Nombramiento Nº 2724 del 22 de noviembre de 2013, posesionado mediante Acta No. 000141 del 25 de noviembre de 2013 por una parte, y por la otra la **FUNDACIÓN GEM** representada en este acto por **JOHN SCHNEIDER** en su calidad de Secretario General, hemos acordado suscribir el presente Convenio Especial de Cooperación previas las siguientes:

**CONSIDERACIONES**

Que la Dirección Técnica de Geoamenazas del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** ha elaborado los estudios previos y del sector correspondientes, los cuales podrán ser consultados físicamente en la Oficina del Grupo de Contratos y Convenios del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**.

Que el Comité de Contratación del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**, en su sesión del 26 de octubre de 2016, recomendó al Director General celebrar el Convenio Especial de Cooperación en Ciencia, Tecnología e Innovación bajo el objeto citado.

Que el Director General del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**, atendiendo la recomendación del Comité de Contratación, mediante Resolución motivada que forma parte integral del presente documento, declaró justificada la celebración de este Convenio Especial de Cooperación en Ciencia, Tecnología e Innovación, con fundamento en lo establecido en los Artículos 6° del Decreto 393 de 1991, 7 y 17 del Decreto 591 de 1991.

Que de conformidad con lo anterior, las partes acuerdan suscribir el presente Convenio Especial de Cooperación en Ciencia, Tecnología e Innovación, el cual se rige por las siguientes:

**CLÁUSULAS**

**PRIMERA.– OBJETO**: AUNAR ESFUERZOS HUMANOS, LOGÍSTICOS Y FINANCIEROS ENTRE EL **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** Y LA **FUNDACIÓN GEM** CON EL FIN DE GENERAR E IMPLEMENTAR "UN NUEVO MODELO DE AMENAZA SÍSMICA NACIONAL PARA COLOMBIA".

**SEGUNDA.- ALCANCE DEL OBJETO:** El objeto del convenio tendrá el siguiente alcance: **(i)** Revisar y reformular la definición y el manejo de las fuentes sismogénicas y la estimación de sus tasas de actividad. **(ii)** Seleccionar e implementar el conjunto de ecuaciones de predicción de movimiento del terreno más apropiadas para Colombia. **(iii)** Implementar un nuevo modelo de amenaza sísmico nacional para Colombia.

**TERCERA. – PLAZO**: El plazo de ejecución del presente Convenio será hasta el 31 de diciembre de 2016.

**PARÁGRAFO:** El plazo de ejecución del presente Convenio Especial de Cooperación podrá ser modificado y prorrogado por mutuo acuerdo entre las partes, en cualquier momento y antes de su vencimiento.

**CUARTA. – VALOR TOTAL DEL CONVENIO Y APORTES:** El valor total del convenio asciende a la suma de **CUARENTA MIL EUROS ($40,000€)**, que serán aportados por las partes así:

a. **EL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** realizará un aporte en dinero por la suma de **QUINCE MIL EUROS ($15,000€)**, para respaldar los costos de las actividades relacionadas con la modelación y la sesión de trabajo presencial en que incurrirá la **FUNDACIÓN GEM**. Adicionalmente, el **SGC** realizará aportes en especie correspondiente a la disponibilidad del personal profesional requerido para la correcta ejecución del convenio valorado en la suma de **DIEZ MIL EUROS ($10,000€)**.

   **PARAGRAFO PRIMERO:** El aporte en dinero del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** se encuentra soportado con Certificado de Disponibilidad Presupuestal SGRINV 108916 expedido el 25 de octubre de 2016.

   **PARAGRAFO SEGUNDO:** Este aporte será desembolsado a la **FUNDACIÓN GEM** de acuerdo a la TRM (Tasa Representativa del Mercado) que se encuentre vigente en Colombia en la fecha en que se realice el desembolso previsto en la cláusula cuarta del presente convenio.

b. **LA FUNDACIÓN GEM** realizará aportes en especie correspondiente a una asesoría, apoyo y acompañamiento con el fin de generar un nuevo modelo de amenaza sísmica nacional para Colombia valorados en la suma **DE QUINCE MIL EUROS ($15,000€)** por cuenta del costo del tiempo y disponibilidad de los expertos requeridos para la ejecución de las actividades definidas.

   Las actividades previstas a desarrollar en virtud del presente convenio y los aportes de las partes se encuentran discriminados tal como lo establecen los estudios previos, los cuales hacen parte integral del presente Convenio.

**QUINTA.– DESEMBOLSO DE LOS APORTES:** Los aportes en dinero realizados por parte del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** serán desembolsados a la **FUNDACIÓN GEM** así: Un único desembolso por valor de **QUINCE MIL EUROS ($15,000€)** contra la entrega del primer informe de ejecución previamente aprobado por el Supervisor del convenio por parte del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**.

**SEXTA.– OBLIGACIONES DE LAS PARTES:** a. **DEL SGC: El SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** aportará los recursos económicos para cubrir los costos de desplazamiento a Colombia de los expertos que pondrá a disposición del convenio la **FUNDACIÓN GEM**, así como los recursos para la asesoría, apoyo y acompañamiento necesarios para la generación e implementación del modelo. Adicionalmente el **SGC** dispondrá de todo el personal profesional requerido para la correcta ejecución del convenio. b. **DE LA FUNDACIÓN GEM:** La **FUNDACIÓN GEM** aportará expertos en evaluación y zonificación de amenaza sísmica para la evaluación de amenaza sísmica nacional de Colombia, con quienes se trabajará de forma remota en sesiones estructuradas y se realizará una sesión presencial en Bogotá. La **FUNDACIÓN GEM** elaborará y presentará dos (2) informes sobre el avance de ejecución del convenio, un primer informe al inicio y un informe final.

**SÉPTIMA. – SUPERVISIÓN:** Con el fin de inspeccionar, vigilar y controlar el cumplimiento correcto y oportuno del presente Convenio y tomar las decisiones necesarias para el efecto, cada una de las partes podrá designar un Supervisor. La Supervisión por parte del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** la ejercerá la Profesional Especializada María Mónica Arcila Rivera de la Dirección de Geoamenzas a quien corresponderá ejercer, con estricta sujeción a este Convenio, el control del mismo hasta su finalización. La Supervisión por parte de la **FUNDACIÓN GEM** la ejercerá el Coordinador de las actividades relacionadas con la amenaza sísmica en la Fundación GEM, Dr. Marco Pagani.

**OCTAVA.- PROPIEDAD INTELECTUAL:** Toda la propiedad intelectual resultante de las tareas y actividades ejecutadas en el marco del presente Convenio atendiendo a los términos y condiciones establecidos en el mismo, pertenecerá al **SGC** y **GEM**. Para los efectos de este Convenio se entiende por propiedad intelectual, pero sin que se limite la información, imágenes, textos, fotografías, grabaciones y productos derivados de estos desarrollados en el presente Convenio.

**PARÁGRAFO PRIMERO:** En toda publicación que se genere en la que se haga referencia a informaciones recabadas por **GEM** y/o el **SGC** en la ejecución del presente Convenio, se hará reconocimiento expreso del rol de **GEM** y del **SGC** en la obtención de dichos datos y del apoyo brindado por dichas entidades.

**PARÁGRAFO SEGUNDO:** Ninguna de las partes podrá hacer uso del nombre y/o logo de la contraria sin la autorización previa y por escrito de la parte propietaria del nombre y/o logo. Incluso en dichos casos la parte a la que se le autorice el uso del nombre y/o logo deberá cumplir con las políticas internas de la parte propietaria del nombre y/o logo cuyo uso se ha autorizado, referentes a color, tamaño, colocación, espacio entre un logo y otro, etc.

**PARÁGRAFO TERCERO:** Las partes acuerdan que la **FUNDACIÓN GEM** entiende hacer públicamente accesible a la comunidad científica los resultados obtenidos aplicando su póliza estándar de licencia[1]. La póliza estándar es publicar los datos y modelos bajo los términos de la "Creative Commons Attributtion – Share Alike 4.0 International license (CC BY-SA 4.0)"[2] y el código de cálculo bajo los términos de la "Affero General Public License v.3 (AGPL v.3)"[3].

**NOVENA.– CONFIDENCIALIDAD:** Las partes se obligan a no divulgar la información con carácter confidencial que llegaren a conocer de la otra o la que surgiera en ejecución y en virtud del presente Convenio, entendiéndose por ésta, cualquier información societaria, técnica, financiera, jurídica, comercial y estratégica, técnica y de datos, y cualquier información que pudiera conocer relacionada con sus operaciones de negocios presente y futuros, de la cual tenga conocimiento o llegue a tener mediante cualquier medio o circunstancia, en virtud de la celebración, ejecución, terminación y liquidación del presente convenio, so pena de hacerse responsable de los perjuicios que se causen a la otra parte. Asimismo, las partes se comprometen a no comunicar a terceros la información confidencial no publicada, que se hubiere entregado u obtenido con motivo de la celebración, ejecución, terminación y liquidación del presente convenio, salvo que cuenten con autorización expresa de la otra parte. Esta obligación subsistirá aún después del vencimiento del mismo.

**DÉCIMA.- CESIÓN:** Ninguna de las partes podrá ceder su participación en el presente Convenio, durante la ejecución del mismo, sino mediante autorización previa y escrita de la otra Parte, so pena de darse por terminado el presente Convenio.

**DÉCIMA PRIMERA.- CAUSALES DE TERMINACIÓN:** El presente convenio se podrá dar por terminado en los siguientes eventos: **a.** Por mutuo acuerdo entre las partes. **b.** Por ejecución y cumplimiento del objeto del convenio. **c.** Por incumplimiento de las obligaciones a cargo de cualquiera de las partes. **d.** Por vencimiento del plazo de ejecución previsto.

**DÉCIMA SEGUNDA.- REQUISITOS DE PERFECCIONAMIENTO Y EJECUCIÓN:** El presente convenio se perfeccionará con la firma de las partes. Para su ejecución se requerirá de la expedición por parte del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** del registro presupuestal correspondiente.

Para constancia se firman dos (2) ejemplares del mismo tenor el 08 NOV 2016

**OSCAR ELADIO PAREDES ZAPATA**
Director General
**SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**

**JOHN SCHNEIDER**
Secretario General
**FUNDACIÓN GEM**
5 Nov 2016

Proyectó: Mónica Pongutá Achury – Coordinadora GCC____
Reviso: Tatiana Baquero Iguarán - Abogada Secretaría General____
Vo.Bo.: Iván Sarmiento - Secretario General____

[1] http://www.globalquakemodel.org/gem/terms/licensing/
[2] http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/
[3] http://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.html

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Conocimiento Geocientífico 100 años 1916 - 2016

MINMINAS

TODOS POR UN NUEVO PAÍS

**CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN No. 27 DE 2016**

**ANEXO.- ACTIVIDADES PREVISTAS**

El presente convenio tendrá el siguiente alcance:

(i) Revisar, reformular la definición y el manejo de las fuentes sismogénicas y la estimación de sus tasas de actividad.

(ii) Seleccionar e implementar el conjunto de ecuaciones de predicción de movimiento del terreno más apropiadas para Colombia.

(iii) Implementar un nuevo modelo de amenaza sísmico nacional para Colombia.

Con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos previstos, las actividades a desarrollar y los aportes de las partes se encuentran discriminados así:

| ***Item*** | ***Actividad*** | ***Presupuesto SGC*** | ***Recursos en especie SGC*** | ***Recursos en especie GEM*** |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Revisión y ajuste de la información disponible preparada por el SGC | 1,000€ | 1,000€ | 1,000€ |
| 2 | Manejo de fuentes sismogénicas y estimación de las tasas de actividad sísmica del modelo | 2,000€ | 2,000€ | 3,000€ |
| 3 | Implementación de dos ecuaciones de atenuación para Colombia utilizadas en las normativas sísmicas vigentes en el país | 2,000€ | 1,000€ | 3,000€ |
| 4 | Selección de ecuaciones de atenuación para el cálculo de la amenaza y definición del árbol lógico | 3,000€ | 1,000€ | ------ |
| 5 | Implementación del modelo de fuentes sismogénicas en "OpenQuake engine" | 5,000€ | 3,000€ | 5,000€ |
| 6 | Cálculo de la amenaza utilizando el "OpenQuake engine" | 2,000€ | 2,000€ | 3,000€ |
| ***Subtotales*** | | ***15,000€*** | ***10,000€*** | ***15,000€*** |
| | ***TOTAL*** | | ***40,000€*** | |

**OSCAR ELADIO PAREDES ZAPATA**
Director General
**SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**

**JOHN SCHNEIDER**
Secretario General
**FUNDACIÓN GEM**

Proyectó: Mónica Pongutá Achury – Coordinadora GCC____
Reviso: Tatiana Baquero Iguarán - Abogada Secretaria General_____
Vo.Bo.: Iván Sarmiento - Secretario General_____

5 de noviembre de 2016

**Fondazione GEM**
27100 Pavia – Via Ferrata n. 1
C.F. 96059180180 – P. IVA 02585230184
Tel. +39 0382.5169865 – Fax +39 0382.529131
www.globalquakemodel.org

Fondazione GEM
REF. N. 32 YEAR 2017
USCITA

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO | Conocimiento Geocientífico 100 años 1916 - 2016 | MINMINAS | TODOS POR UN NUEVO PAÍS PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN

**CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN No. 12 DE 2017**

**OBJETO:** *"Aunar esfuerzos humanos, logísticos y financieros entre el Servicio Geológico Colombiano y la Fundación GEM con el fin de mejorar el modelo de amenaza sísmica nacional propuesto en 2016; diseminar los resultados del análisis de amenaza sísmica a través del portal web del SGC; proponer lineamientos y desarrollar un caso de estudio respecto a la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios indispensables, de atención a la comunidad y de Ocupación Especial (EI/AC/OE). Dichos objetivos se realizarán mediante el intercambio de información técnica, científica y la experiencia entre las partes, usando datos recientes y metodologías del estado del arte a nivel mundial".*

**VALOR APORTES:** **DOSCIENTOS DIEZ MIL EUROS (210.000 €)**

**PLAZO:** **HASTA EL 31 DE DICIEMBRE DE 2017.**

Entre los suscritos, el **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO - SGC**, Instituto Científico y Técnico (en adelante "SGC"), con personería jurídica, autonomía administrativa, técnica financiera y patrimonio independiente adscrito al Ministerio de Minas y Energía, que hace parte del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, representado en este acto por **OSCAR ELADIO PAREDES ZAPATA**, mayor de edad, identificado con cédula de ciudadanía N° 19'222.410 de Bogotá, quien actúa en su condición de Director General, en virtud del Decreto de Nombramiento N° 2724 del 22 de noviembre de 2013, posesionado mediante Acta No. 000141 del 25 de noviembre de 2013 por una parte, y por la otra, la **FUNDACIÓN GEM** representada en este acto por **JOHN FREDERICK SCHNEIDER** en su calidad de Secretario General, hemos acordado suscribir el presente Convenio Especial de Cooperación previas las siguientes:

**CONSIDERACIONES**

Que la Dirección Técnica de Geoamenazas del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** ha elaborado los estudios previos y del sector correspondientes, los cuales podrán ser consultados físicamente en la Oficina del Grupo de Contratos y Convenios del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**.

Que el Comité de Contratación del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**, en su sesión del 14 de junio de 2017, recomendó a la Directora General (E) celebrar el Convenio Especial de Cooperación en Ciencia, Tecnología e Innovación bajo el objeto citado.

Que el Director General del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**, atendiendo la recomendación del Comité de Contratación, mediante Resolución motivada que forma parte integral del presente documento, declaró justificada la celebración de este Convenio Especial de Cooperación en Ciencia, Tecnología e Innovación, con fundamento en lo establecido en los Artículos 6° del Decreto 393 de 1991, 7 y 17 del Decreto 591 de 1991.

Que de conformidad con lo anterior, las partes acuerdan suscribir el presente Convenio Especial de Cooperación en Ciencia, Tecnología e Innovación, el cual se rige por las siguientes:

**CLÁUSULAS**

**PRIMERA.– OBJETO**: Aunar esfuerzos humanos, logísticos y financieros entre el **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** y la **FUNDACIÓN GEM** con el fin de mejorar el modelo de amenaza sísmica nacional propuesto en 2016; diseminar los resultados del análisis de amenaza sísmica a través del portal web del SGC; proponer lineamientos y desarrollar un caso de estudio respecto a la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios indispensables, de atención a la comunidad y de Ocupación Especial (EI/AC/OE). Dichos objetivos se realizarán mediante el intercambio de información técnica, científica y la experiencia entre las partes, usando datos recientes y metodologías del estado del arte a nivel mundial.

**SEGUNDA.- ALCANCE DEL OBJETO:** Este convenio de cooperación tiene los alcances específicos conforme las tres temáticas que se describen a continuación:

1. Amenaza sísmica:

**a)** Definir criterios para la caracterización de fuentes sismogénicas tipo falla que sean utilizables en estudios de amenaza sísmica del país, a partir de la base de datos de fallas corticales del SGC, y generar modelo de fuentes tipo falla para nueva evaluación de amenaza sísmica nacional
**b)** Implementar un modelo cortical de sismicidad distribuida obtenido a partir de métodos de suavizado ("smoothing kernel"),
**c)** Incluir una nueva componente al modelo de amenaza integrando un modelo cortical de fuentes tipo falla con el modelo cortical de sismicidad distribuida descrito en el punto b,
**d)** Revisar, validar y actualizar el modelo de subducción y sismicidad intermedia/profunda a partir de la propuesta de zonificación del SGC para este contexto tectónico (no incluida en la versión para discusión precedente),
**e)** Implementar un nuevo modelo de amenaza sísmica para Colombia integrando las componentes descritas anteriormente y el modelo creado en el 2016,
**f)** Obtener los resultados de amenaza en superficie utilizando la zonificación de Vs30 a nivel nacional obtenida recientemente por el SGC

2. Servicio WEB de consulta de los resultados de amenaza sísmica y acceso a un servicio dedicado remoto:

**a)** Desarrollo de una herramienta de visualización que integre la capacidad de gestión y visualización de los resultados obtenidos usando OpenQuake (mapas, curvas, espectros de respuesta uniforme) a través de QGIS y su posterior publicación en el geoportal web del SGC usando GeoNode. El desarrollo de la herramienta se hará utilizando protocolos de intercompatibilidad y formatos estándar.
**b)** Acceso a una mayor capacidad de cómputo a través de un servicio dedicado remoto, accesible usando un protocolo RDP.
**c)** Entrenamiento y asistencia en la instalación y puesta en marcha de la herramienta de visualización y la gestión del servicio dedicado durante el plazo de ejecución del presente convenio

3. Vulnerabilidad y riesgo sísmico:

**a)** Desarrollo de lineamientos para la evaluación de la fragilidad física de edificaciones educativas y de salud (EE/ES), que contengan como mínimo: (i) Definición de objetivos, alcances y limitaciones de los estudios de fragilidad sísmica de EE/ES; (ii) revisión del estado del arte respecto al análisis de fragilidad sísmica de EE/ES; (iii) Propuesta de metodologías para la evaluación de la fragilidad estructural de EE/ES y de la correspondiente información mínima para el análisis según el alcance de la evaluación. Para esta actividad el SGC tendrá personal a cargo para el desarrollo de los lineamientos. Expertos de la fundación GEM brindarán acompañamiento técnico. El entregable de esta actividad corresponde a un documento técnico con lineamientos para la evaluación de la fragilidad física de EE/ES, elaborado por el SGC y revisado por GEM.
**b)** Caso de estudio respecto a la evaluación de la fragilidad física de un conjunto de EE/ES: El SGC seleccionará un conjunto de EE/ES para el análisis de su fragilidad física. El SGC será responsable de la adquisición de la información necesaria para la evaluación. El SGC tendrá personal a su cargo para la evaluación de la fragilidad física de acuerdo con los lineamientos descritos en la actividad (3a). Expertos de la fundación GEM brindarán acompañamiento técnico en el cálculo de la fragilidad física de los edificios seleccionados. El entregable de esta actividad corresponde a un documento técnico con los resultados de la evaluación de la fragilidad física de los edificios seleccionados.

**TERCERA. – COMPROMISOS DE LAS PARTES:** Este esfuerzo de colaboración se desarrollará a través de sesiones de trabajo remotas entre los profesionales colombianos involucrados en los diferentes tópicos y los expertos de la Fundación GEM; y de trabajo presencial en la sede del SGC en Bogotá, Colombia.

El trabajo presencial no debe superar el límite de cinco (05) semanas y su duración dependerá de las temáticas descritas en el alcance del convenio.

Para la ejecución del presente Convenio, el SGC se compromete a cubrir los costos para la implementación de las actividades descritas en el alcance del objeto, y el desplazamiento a Colombia de los expertos que pondrá a disposición del cumplimiento del presente Convenio la Fundación GEM.

Para la ejecución del presente Convenio, la Fundación GEM se compromete a aportar los expertos requeridos para la ejecución de las actividades definidas en el alcance del objeto.

**CUARTA. – PLAZO**: El plazo de ejecución del presente Convenio será hasta el 31 de diciembre de 2017.

**PARÁGRAFO:** El plazo de ejecución del presente convenio Especial de Cooperación podrá ser modificado y prorrogado por mutuo acuerdo entre las partes, en cualquier momento y antes de su vencimiento.

**QUINTA. – VALOR TOTAL DEL CONVENIO Y APORTES:** El valor total del convenio asciende a la suma de **DOSCIENTOS DIEZ MIL EUROS (210.000 €)**, que serán aportados por las partes así:

a) **EL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** realizará un aporte en dinero por la suma de **CIENTO DOCE MIL EUROS (112.000 €)**, para respaldar los costos de las actividades definidas y para el desplazamiento a Colombia de los expertos que pondrá a disposición del Convenio la **FUNDACIÓN GEM.** Adicionalmente, el **SGC** dispondrá de todo el personal profesional requerido para la correcta ejecución del convenio.

**PARÁGRAFO PRIMERO:** Este aporte se encuentra soportado con Certificado de Disponibilidad Presupuestal PGN 72517 expedido el 09 de junio de 2017.

**PARÁGRAFO SEGUNDO:** Este aporte será desembolsado a la **FUNDACIÓN GEM** de acuerdo a la TRM (Tasa Representativa del Mercado) que se encuentre vigente en Colombia en la fecha en que se realice el desembolso.

b) **LA FUNDACIÓN GEM** realizará aportes en especie correspondiente a una asesoría, apoyo y acompañamiento valorados en la suma de **NOVENTA Y OCHO MIL EUROS (98.000 €)**, por cuenta del costo del tiempo de los expertos que dispondrá para la ejecución de las actividades definidas.

Las actividades previstas a desarrollar en virtud del presente convenio y los aportes de las partes se encuentran discriminados así:

**1. Amenaza sísmica**

| ÍTEM | ACTIVIDAD | Aporte SGC | Aporte GEM | VALOR |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| 1a | Revisión, ajuste y definición de fuentes sismogénicas tipo falla | € 13,500.00 | € 13,500.00 | € 27,000.00 |
| 1b | Implementación de un modelo cortical de sismicidad distribuida ("*smoothing kernel*") | € 2,000.00 | € 2,500.00 | € 4,500.00 |
| 1c | Definición de un modelo cortical integrando fallas + sismicidad distribuida | € 4,500.00 | € 4,500.00 | € 9,000.00 |
| 1d | Mejora y validación del modelo de subducción y sismicidad intermedia/profunda | € 9,000.00 | € 9,000.00 | € 18,000.00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1e | Implementación del modelo de amenaza (versión 2017) en el "*OpenQuake engine*" | € 2,000.00 | € 2,500.00 | € 4,500.00 |
| 1f | Cálculo de la amenaza en superficie utilizando el "*OpenQuake engine*" y el modelo nacional de Vs30. Reporte de investigación. | € 4,500.00 | € 4,500.00 | € 9,000.00 |
| | Costos de las visitas al SGC | € 6,000.00 | | € 6,000.00 |
| | Revisión de las actividades, reportes y resultados | € 6,000.00 | € 6,000.00 | € 12,000.00 |
| **Subtotal Amenaza sísmica** | | **€ 47,500.00** | **€ 42,500.00** | **€ 90,000.00** |

**2. Servicio WEB de consulta de los resultados de amenaza sísmica y acceso a un servicio dedicado remoto**

| ÍTEM | ACTIVIDAD | Aporte SGC | Aporte GEM | VALOR |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| 2a | Desarrollo de una herramienta de visualización de la amenaza sísmica | € 27,000.00 | € 27,000.00 | € 54,000.00 |
| 2b | Acceso a una mayor capacidad de computo a través de un servicio dedicado remoto | € 3,000.00 | € 3,000.00 | € 6,000.00 |
| 2c | Asistencia técnica remota y mantenimiento del servicio dedicado | € 3,000.00 | € 3,000.00 | € 6,000.00 |
| | Costo de la visita al SGC | € 3,000.00 | | € 3,000.00 |
| | Revisión de las actividades, reportes y resultados | € 3,000.00 | € 3,000.00 | € 6,000.00 |
| **Subtotal servicio WEB de consulta y acceso a servicio dedicado** | | **€ 39,000.00** | **€ 36,000.00** | **€ 75,000.00** |

**3. Vulnerabilidad y riesgo sísmico**

| ÍTEM | ACTIVIDAD | Aporte SGC | Aporte GEM | VALOR |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| 3a | Acompañamiento y revisión de lineamientos para evaluación de la fragilidad física de edificaciones educativas y de salud (EE/ES) | € 8,250.00 | € 8,250.00 | € 16,500.00 |
| 3b | Acompañamiento y revisión para caso de estudio en evaluación de la fragilidad física de un conjunto de EE/ES | € 8,250.00 | € 8,250.00 | € 16,500.00 |
| | Costos de las visitas al SGC | € 6,000.00 | | € 6,000.00 |
| | Revisión de las actividades, reportes y resultados | € 3,000.00 | € 3,000.00 | € 6,000.00 |
| **Subtotal Vulnerabilidad y riesgo sísmico** | | **€ 25,500.00** | **€ 19,500.00** | **€ 45,000.00** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **TOTAL COLABORACIÓN CIENTÍFICA** | **€ 112,000.00** | **€ 98,000.00** | **€ 210,000.00** |

**SEXTA. – DESEMBOLSO DE LOS APORTES:** Los aportes en dinero realizados por parte del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** serán desembolsados a la Fundación GEM así:

I. Un primer desembolso por valor de **VEINTIDÓS MIL EUROS (22,000€)** en el primer mes, a la entrega de un plan de actividades y el prototipo de la herramienta de visualización.

II. Un segundo desembolso de **CUARENTA Y CINCO MIL (45,000€)** en el mes cuatro, a la entrega de una versión preliminar del modelo de amenaza con las nuevas componentes previstas en este Convenio, una versión preliminar de la herramienta de visualización y un documento preliminar para evaluación de la

fragilidad física de edificios indispensables, de atención a la comunidad y de Ocupación Especial (EI/AC/OE).

**III.** Un tercer y último desembolso por valor de **CUARENTA Y CINCO MIL (45,000€)** a la entrega final de los resultados previstos en este Convenio.

**SÉPTIMA.– OBLIGACIONES DE LAS PARTES: a. DEL SGC:** El **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** aportará los recursos económicos para cubrir los costos de desplazamiento a Colombia de los expertos que pondrá a disposición del convenio la **FUNDACIÓN GEM,** así como los recursos para la asesoría, apoyo y acompañamiento necesarios para el mejoramiento del modelo de amenaza sísmica nacional propuesto en el año 2016; diseminar los resultados del análisis de amenaza sísmica a través del portal web del SGC; proponer lineamientos y desarrollar un caso de estudio respecto a la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios indispensables, de atención a la comunidad y de Ocupación Especial (EI/AC/OE). Adicionalmente el **SGC** dispondrá de todo el personal profesional requerido para la correcta ejecución del convenio. **b. DE LA FUNDACIÓN GEM:** La **FUNDACIÓN GEM** aportará expertos en evaluación de amenaza sísmica, tecnologías de la información y riesgo sísmico, con quienes se trabajará de forma remota en sesiones estructuradas y se realizaran sesiones presenciales en Bogotá.

**OCTAVA. – SUPERVISIÓN:** Con el fin de inspeccionar, vigilar y controlar el cumplimiento correcto y oportuno del presente Convenio y tomar las decisiones necesarias para el efecto, cada una de las partes podrá designar un Supervisor. La Supervisión por parte del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** la ejercerá **MARÍA MÓNICA MATILDE ARCILA RIVERA – PROFESIONAL ESPECIALIZADA** de la **DIRECCIÓN DE GEOAMENAZAS**, o de quien el Secretario General designe por escrito, a quien corresponderá ejercer, con estricta sujeción a este Convenio, el control del mismo hasta su finalización. La Supervisión por parte de **GEM** la ejercerá un experto designado por el Secretario General de la **FUNDACIÓN GEM.**

**NOVENA.- PROPIEDAD INTELECTUAL:** Toda la propiedad intelectual resultante de las tareas y actividades ejecutadas en el marco del presente Convenio atendiendo a los términos y condiciones establecidos en el mismo, pertenecerá al **SGC** y **GEM**. Para los efectos de este Convenio se entiende por propiedad intelectual, pero sin que se limite la información, imágenes, textos, fotografías, grabaciones y productos derivados de estos desarrollados en el presente Convenio. **PARÁGRAFO PRIMERO:** En toda publicación que se genere en la que se haga referencia a informaciones recabadas por **GEM** y/o el **SGC** en la ejecución del presente Convenio, se hará reconocimiento expreso del rol de **GEM** y del **SGC** en la obtención de dichos datos y del apoyo brindado por dichas entidades. **PARÁGRAFO SEGUNDO:** Ninguna de las partes podrá hacer uso del nombre y/o logo de la contraria sin la autorización previa y por escrita de la parte propietaria del nombre y/o logo. Incluso en dichos casos la parte a la que se le autorice el uso del nombre y/o logo deberá cumplir con las políticas internas de la parte propietaria del nombre y/o logo cuyo uso se ha autorizado, referentes a color, tamaño, colocación, espacio entre un logo y otro, etc. **PARÁGRAFO TERCERO:** Las partes acuerdan que la **FUNDACIÓN GEM** entiende hacer públicamente accesible a la comunidad científica los resultados obtenidos aplicando su póliza estándar de licencia[1]. La póliza estándar es publicar los datos y modelos bajo los términos de la "Creative Commons Attributtion – Share Alike 4.0 International license (CC BY-SA 4.0)"[2] y el código de cálculo bajo los términos de la "Affero General Public License v.3 (AGPL v.3)"[3].

**DECIMA. – CESIÓN:** Ninguna de las partes podrá ceder los derechos y obligaciones que surgen del mismo, sino mediante autorización previa y escrita de la otra Parte, so pena de darse por terminado el presente Convenio.

**DÉCIMA PRIMERA. - CONFIDENCIALIDAD:** Las partes se obligan a no divulgar la información con carácter confidencial que llegaren a conocer de la otra o la que surgiera en ejecución y en virtud del presente Convenio, entendiéndose por ésta, cualquier información societaria, técnica, financiera, jurídica, comercial y estratégica,

---

1 http://www.globalquakemodel.org/gem/terms/licensing/
2 http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/
3 http://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.html

técnica y de datos, y cualquier información que pudiera conocer relacionada con sus operaciones de negocios presente y futuros, de la cual tenga conocimiento o llegue a tener mediante cualquier medio o circunstancia, en virtud de la celebración, ejecución, terminación y liquidación del presente convenio, so pena de hacerse responsable de los perjuicios que se causen a la otra parte. Así mismo, las partes se comprometen a no comunicar a terceros la información no publicada que hayan obtenido como motivo de la celebración, ejecución, terminación y liquidación del presente convenio, salvo que cuenten con autorización expresa de la otra parte. Esta obligación subsistirá aún después del vencimiento del mismo.

**DÉCIMA SEGUNDA.- CAUSALES DE TERMINACIÓN:** el presente convenio se podrá dar por terminado en los siguientes eventos: **a.** Por mutuo acuerdo entre las partes. **b.** Por ejecución y cumplimiento del objeto del convenio. **c.** Por incumplimiento de las obligaciones a cargo de cualquiera de las partes. **d.** Por vencimiento del plazo de ejecución previsto.

**DÉCIMA TERCERA.- REQUISITOS DE PERFECCIONAMIENTO Y EJECUCIÓN:** El presente convenio de perfeccionará con la firma de las partes. Para su ejecución se requerirá de la expedición por parte del **SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO** del registro presupuestal correspondiente.

Para constancia se firman el 31 JUL 2017

**OSCAR ELADIO PAREDES ZAPATA**
Director General
**SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**

PAVIA, 31/07/2017
**JOHN FREDERICK SCHNEIDER**
Secretario General
**FUNDACIÓN GEM**

*Proyectó: Danna Narváez Cortes – Abogada GCC*
*Revisó: Abogada Oficina Asesora Jurídica*
*Revisó: Tatiana Baquero- Jefe Oficina Jurídica*
*Vo.Bo.: Ivàn sarmiento Galvis - Secretario General*

# Guía de la OCDE para el cumplimiento regulatorio y las inspecciones

OCDE

# Guía de la OCDE para el cumplimiento regulatorio y las inspecciones

OCDE

MEJORES POLÍTICAS
PARA UNA VIDA MEJOR

El presente trabajo se publica bajo la responsabilidad del Secretario General de la OCDE. Las opiniones expresadas y los argumentos utilizados en el mismo no reflejan necesariamente el punto de vista oficial de los países miembros de la OCDE.

Tanto este documento, así como cualquier dato y cualquier mapa que se incluya en él, se entenderán sin perjuicio respecto al estatus o la soberanía de cualquier territorio, a la delimitación de fronteras y límites internacionales, ni al nombre de cualquier territorio, ciudad o área.

**Por favor, cite esta publicación de la siguiente manera:**
OECD (2019), *Guía de la OCDE para el cumplimiento regulatorio y las inspecciones*, OECD Publishing, Paris, *https://doi.org/10.1787/0fe43505-es*.

ISBN 978-92-64-98938-2 (impresa)
ISBN 978-92-64-86156-5 (pdf)

Los datos estadísticos para Israel son suministrados por y bajo la responsabilidad de las autoridades israelíes competentes. El uso de estos datos por la OCDE es sin perjuicio del estatuto de los Altos del Golán, Jerusalén Este y los asentamientos israelíes en Cisjordania bajo los términos del derecho internacional.

**Imágenes:** Portada ilustración © EtiAmmos/Shutterstock.com.

Las erratas de las publicaciones de la OCDE se encuentran en línea en: *www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm*.

© OCDE 2019

Usted puede copiar, descargar o imprimir los contenidos de la OCDE para su propio uso y puede incluir extractos de publicaciones, bases de datos y productos de multimedia en sus propios documentos, presentaciones, blogs, sitios web y materiales docentes, siempre y cuando se dé el adecuado reconocimiento a la fuente y al propietario del copyright. Toda solicitud para uso público o comercial y derechos de traducción deberá dirigirse a *rights@oecd.org*. Las solicitudes de permisos para fotocopiar partes de este material con fines comerciales o de uso público deben dirigirse al Copyright Clearance Center (CCC) en *info@copyright.com* o al Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) en *contact@cfcopies.com*.

# *Prefacio*

La regulación es indispensable para el funcionamiento adecuado de la economía y de la sociedad; son las "reglas del juego" para los ciudadanos, las empresas, el gobierno y la sociedad civil. Fortalecen el mercado, protegen los derechos, brindan seguridad a los ciudadanos, y aseguran la prestación de bienes y servicios públicos. El objetivo de la política regulatoria es asegurar que el marco legal funcione de manera efectiva en pro del interés público.

La forma en que se diseñan las normas constituye un factor primordial tanto para las empresas y ciudadanos, como para los resultados que se obtengan producto de su aplicación. Sin embargo, la manera en que las regulaciones se implementan y cumplen, y la forma como se promueve el cumplimiento del marco regulatorio resulta un determinante crítico para que el sistema normativo funcione de la manera deseada.

Las inspecciones constituyen una de las maneras más importantes de hacer cumplir las normas y de asegurar el respeto a las leyes. Como se mostró en los *Principios de la OCDE sobre las Mejores Prácticas para el Cumplimiento de las Normas e Inspecciones* (OECD, 2014[1]), existen muchas actividades que las inspecciones tienen en común y que son relevantes para todos o para la mayoría de los sectores en los que se llevan a cabo inspecciones. Estos temas incluyen el planeamiento y un mejor enfoque de las inspecciones, la comunicación con los sujetos regulados, prevención de la corrupción y la promoción de un comportamiento ético, así como la organización de las inspecciones y la gobernanza de las autoridades encargadas de ellas.

La *Guía de la OCDE para el Cumplimiento Regulatorio y las Inspecciones* presenta una lista de 12 criterios para ayudar a los funcionarios, reguladores, grupos de interés y expertos a evaluar el grado de desarrollo del sistema de inspecciones y promoción del cumplimiento de las normas en una jurisdicción o de una institución o estructura específica, para identificar fortalezas, debilidades y oportunidades de mejora.

Este documento se basa en trabajos anteriores de la OCDE para la promoción de la reforma regulatoria y para la implementación de prácticas regulatorias sólidas en todos los niveles de gobierno. El conjunto de la información y las experiencias reunidas se encuentra resumido en la *Recomendación del Consejo sobre Política y Gobernanza Regulatoria* (OECD, 2012[2]).

# *Reconocimientos*

Este documento ha sido preparado por Daniel Trnka, Analista Senior de Políticas de la OCDE, en cooperación con Florentin Blanc, consultor y especialista en reformas de inspección, bajo la supervisión de Nick Malyshev, Jefe de la División de Política Regulatoria, y Marcos Bonturi, Director de Gobernanza Pública de la OCDE. Jennifer Stein estuvo a cargo de la coordinación del proceso editorial. Hacemos extensivo nuestro agradecimiento a todos los miembros del Comité de Políticas Regulatorias y a la Red de Reguladores Económicos, quienes proporcionaron comentarios sustantivos y su apoyo para la preparación de los distintos borradores de esta Guía.

Comentarios extensos y útiles fueron recabados mediante consultas públicas, incluyendo los provenientes del Ministerio de Hacienda y Función Pública de España, el Ministerio de Asuntos Económicos y Clima de Holanda, el Gobierno de Japón, la Autoridad Reguladora de Energía de Francia, el Instituto Nacional de Metrología, Calidad y Tecnología de Brasil, Paul van Dijk, Mindert Mulder y Rob Velders de Holanda, y Ane Kasdorp, Estrategia de Supervisión de Holanda.

La versión en español ha sido un aporte de Tessy Torres y Karina Montes del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental – OEFA, del Perú, con contribuciones de Gloriana Madrigal y Manuel Gerardo Flores de OCDE.

# *Índice*

**Resumen ejecutivo** ..... 7
**Introducción** ..... 9
**Criterio 1. Cumplimiento basado en evidencia** ..... 13
**Criterio 2. Selectividad** ..... 17
**Criterio 3. Enfoque de riesgo y proporcionalidad** ..... 21
**Criterio 4. Regulación responsiva** ..... 25
**Criterio 5. Visión de largo plazo** ..... 29
**Criterio 6. Coordinación y consolidación** ..... 31
**Criterio 7. Gobernanza transparente** ..... 35
**Criterio 8. Integración de la información** ..... 39
**Criterio 9. Procesos claros y justos** ..... 42
**Criterio 10. Promoción del cumplimiento** ..... 45
**Criterio 11: Profesionalismo** ..... 48
**Criterio 12: Poniendo los pies sobre la tierra** ..... 50
**Referencias** ..... 53

# *Resumen ejecutivo*

La *Guía de la OCDE para el Cumplimiento Regulatorio y las Inspecciones* se basa en los *Principios de la OCDE sobre las Mejores Prácticas para el Cumplimiento de las Normas e Inspecciones* (OECD, 2014[1]). El documento ofrece a los funcionarios gubernamentales, legisladores, grupos de interés y expertos – incluyendo al Secretariado de la OCDE – una herramienta sencilla para la evaluación del grado de desarrollo del sistema de inspecciones y de cumplimiento de las normas en una jurisdicción, institución o estructura específica, para identificar fortalezas, debilidades y oportunidades de mejora.

El documento presenta una lista de 12 criterios que corresponden a los 11 Principios de la *OCDE sobre las Mejores Prácticas para el Cumplimiento de las Normas e Inspecciones* (OECD, 2014[1]), además de un décimo segundo criterio para "poner los pies sobre la tierra" referido al desempeño institucional. Estos criterios están divididos en sub criterios para facilitar su uso.

Los doce (12) criterios son:

1. **Cumplimiento basado en evidencia:** Las inspecciones y la promoción del cumplimiento de las normas deben basarse en evidencia y en indicadores: la toma de decisiones sobre qué y cómo inspeccionar debe fundamentarse en datos y evidencia y los resultados deben ser evaluados con regularidad.
2. **Selectividad:** En la medida de lo posible, la promoción del cumplimiento y la aplicación de las normas deben ser dejadas a las fuerzas del mercado, al sector privado y a la sociedad civil: las inspecciones y la promoción del cumplimiento no pueden llevarse a cabo en todos los entes regulados ni pueden atender todas las situaciones. Existen muchas otras formas de lograr los objetivos de las normas y su cumplimiento.
3. **Enfoque de riesgo y proporcionalidad:** La promoción del cumplimiento de las normas debe hacerse según los riesgos involucrados y proporcionalmente: la frecuencia de las inspecciones y los recursos a emplearse deben ser proporcionales al nivel de riesgo y las acciones de cumplimiento de las normas deben dirigirse a la reducción de los riesgos reales derivados de las infracciones.
4. **Regulación responsiva:** El hacer cumplir las normas debe basarse en principios de "regulación responsiva"; es decir, las acciones de promoción del cumplimiento e inspecciones deben ser adecuadas al perfil y al comportamiento de los sujetos regulados.
5. **Visión de largo plazo:** Los gobiernos deben adoptar políticas en materia de inspecciones y promoción del cumplimiento de las normas y establecer mecanismos institucionales con objetivos definidos y una estrategia de largo plazo.
6. **Coordinación y consolidación:** Las actividades de inspección deben ser coordinadas y, cuando sea necesario, consolidadas: con menos duplicaciones y superposiciones se asegura un mejor uso de los recursos públicos, minimizando la carga en los administrados y maximizando la efectividad.

7. **Gobernanza transparente:** Las estructuras de gobernanza y las políticas de recursos humanos, deben basarse en la transparencia, el profesionalismo y la gestión por resultados. Las acciones para la promoción del cumplimiento de las normas deben estar libres de toda influencia política y los esfuerzos deben ser recompensados.
8. **Integración de la información:** Se debe emplear tecnologías de la información para maximizar un enfoque de riesgos, promover la coordinación y el intercambio de información y asegurar el uso óptimo de los recursos.
9. **Procesos claros y justos:** Los gobiernos deben asegurarse que las reglas y los procesos para las inspecciones y la promoción del cumplimiento sean claros. Se debe adoptar y difundir legislación coherente y adecuada; los derechos y obligaciones de los funcionarios y de las empresas deben estar claramente establecidos.
10. **Promoción del cumplimiento:** Se debe promover la transparencia y el cumplimiento de las normas mediante el empleo de instrumentos adecuados como guías, herramientas y listas de verificación.
11. **Profesionalismo:** Los inspectores deben ser capacitados y dirigidos de manera que se asegure su profesionalismo, integridad, consistencia y transparencia. Todo ello exige un entrenamiento sustancial, con un enfoque no sólo en lo técnico, sino también en destrezas generales relacionadas con los lineamientos vinculados a la promoción del cumplimiento y las inspecciones, a fin de asegurar consistencia e imparcialidad.
12. **"Poniendo los pies sobre la tierra":** Las instituciones a cargo de las inspecciones y de hacer cumplir la normatividad – así como la totalidad del sistema de promoción del cumplimiento – deben alcanzar los niveles de desempeño que se espera de ellos en términos de satisfacción de los interesados, eficiencia (beneficios/costos) y efectividad general (seguridad, salud, protección ambiental, etc.).

Esta Guía han sido diseñadas para evaluar la situación *de facto* de un país o de una institución. Para ello, y a fin de obtener el máximo provecho de esta Guía, los países y las instituciones evaluadas deberán suministrar evidencia concreta del cumplimiento de cada uno de los subcriterios, por ejemplo: documentación oficial, descripciones de los mecanismos institucionales vigentes, o datos específicos acerca de inspecciones concretas y de sus resultados.

# *Introducción*

La *Guía de la OCDE para el Cumplimiento Regulatorio y las Inspecciones* se basa en los *Principios de la OCDE sobre las Mejores Prácticas para el Cumplimiento de las Normas e Inspecciones* (OECD, 2014[1]). El propósito de esta Guía es complementar los Principios para ofrecer a los funcionarios gubernamentales, reguladores, grupos de interés y expertos, así como al Secretariado de la OCDE, una herramienta sencilla para la evaluación del grado de desarrollo del sistema de inspecciones y promoción del cumplimiento de las normas en una jurisdicción, institución o estructura específica y para identificar fortalezas, debilidades y oportunidades de mejora.

La Guía no es de ningún modo vinculantes para los países miembros de la OCDE. Reconocemos que existen diferencias significativas en la manera en que las distintas jurisdicciones se organizan para hacer cumplir las respectivas regulaciones. En muchas jurisdicciones las competencias para la promoción del cumplimiento de las regulaciones se comparten entre los niveles nacional y subnacional del gobierno, el cual en ocasiones es semiautónomo – o autónomo – con respecto al nivel central. Al evaluar mediante esta Guía los sistemas establecidos para hacer cumplir las normas y para las inspecciones, se debe tener en consideración estas diferencias. Sin embargo, la Guía debe formar una base universal y suficientemente flexible para el análisis y autoevaluación[1]. Esperemos que, durante la aplicación de estas Herramientas y sus sub criterios, estas se vean enriquecidas con ejemplos de buenas prácticas.

El documento presenta una lista de verificación de 12 criterios que corresponden a los 11 *Principios de la OCDE sobre las Mejores Prácticas para el Cumplimiento de las Normas e Inspecciones* y un duodécimo criterio "Poniendo los pies sobre la tierra" referido a la medición del desempeño de la institución. Estos criterios están a su vez divididos en subcriterios para facilitar su uso.

La evaluación de los sistemas y de las instituciones que realizan inspecciones y promueven el cumplimiento de las normas, es compleja: implica analizar la legislación, las estructuras institucionales, los recursos humanos y las prácticas que desarrollan, incluyendo a las áreas a cargo de la regulación, los sectores involucrados, etc. Muchos de estos criterios no son fáciles de traducir en indicadores directamente medibles, y aun cuando es posible, no siempre se dispone fácilmente de los datos. El empleo de dicha lista de verificación y de sus distintos indicadores implica un grado significativo de análisis experto y es más "cualitativo" que "cuantitativo". Para hacer que su uso sea más sencillo y más confiable, se ha definido cada uno de los subcriterios de la manera más precisa posible y se han establecido pautas que ayudan a comprenderlos y a sopesarlos.

[1] Donde existan acuerdos/estándares/recomendaciones internacionales relevantes para que los gobiernos implementen en su sistema de inspección y de promoción del cumplimiento de las normas, estos tendrían prelación sobre la Guía.

Un buen sistema de inspecciones y de promoción del cumplimiento de las normas debe apuntar a generar los mejores resultados posibles en términos de prevención o mitigación de riesgos y a promover la prosperidad económica, mejorando el bienestar, persiguiendo el interés público (OECD, 2012[2]) (por ejemplo, mejorando la calidad del medioambiente, la seguridad y salud pública, la calidad de la educación, etc.), sin incurrir en costos excesivos para el Estado ni en mayores cargas para los sujetos regulados, asegurando más bien la confianza y la satisfacción de los diferentes grupos de interés, cuyas perspectivas a menudo entran en conflicto (empresas, organizaciones de la sociedad civil, etc.).

Esto no sólo constituye un gran reto que alcanzar, sino que también es difícil de medir. En primer lugar, porque muchas veces no se dispone de datos, o estos no son confiables debido a las limitaciones de los métodos de medición. En segundo lugar, incluso si existen datos disponibles y confiables, las inspecciones y las acciones de promoción del cumplimiento de las normas sólo tienen efectos indirectos en los indicadores más relevantes de los resultados que se esperan de la regulación.

Por ejemplo, las normas de seguridad alimentaria tienen como objetivo reducir las muertes y las enfermedades generadas por patologías provenientes de los alimentos, pero las regulaciones, las inspecciones y las acciones para hacer cumplir las normas son sólo uno de los muchos factores que determinan si la comida es segura o no. Los inspectores ni preparan ni consumen la comida; la seguridad está en manos de todos los grupos de interés, incluyendo los productores, los distribuidores y los consumidores. Las actividades de inspección y de promoción del cumplimiento de las normas solo pueden tratar de influir en el comportamiento y contribuir a lograr las metas deseadas. Por lo tanto, los cambios en los indicadores del bienestar público alcanzado, son difíciles de atribuir directamente a los cambios producidos por las inspecciones y por las acciones que promueven el cumplimiento de las normas.

Por todas estas razones, es importante emplear los criterios y los subcriterios en conjunto y no de manera aislada. Los buenos resultados en un área no necesariamente serán significativos si el desempeño en otras es bajo. Una alta eficiencia podría no ser algo bueno si ello significa una efectividad reducida y una alta efectividad sin tener en cuenta los costos resultará insostenible.

Al considerar si un sistema o una institución se alinea con un subcriterio específico, los usuarios de esta lista de verificación deben considerar, para su evaluación, una escala gradual en lugar de respuestas binarias. Si dicho subcriterio es alcanzado sólo raras veces por la entidad inspectora o sistema de promoción del cumplimiento, la calificación será negativa. Si el sub criterio es cumplido de manera significativa, pero no de manera general, o si importantes aspectos son alcanzados, pero aún quedan algunas deficiencias, la calificación puede ser considerada como “intermedia”. Si el subcriterio es alcanzado ampliamente o si la mayoría de pautas son cumplidas (incluso si hay áreas en las que se requieren mejoras), la calificación será positiva. No ofrecemos aquí un sistema específico de calificación, pero según el nivel de detalle que se busque, podría haber al menos tres niveles (bajo, promedio y bueno) o cinco (del muy bajo al muy bueno).

**Definición de algunos términos clave**

Según los *Principios de la OCDE sobre las Mejores Prácticas para el Cumplimiento de las Normas e Inspecciones*, la expresión "promoción del cumplimiento" (*enforcement*) deberá ser entendida en su sentido más amplio, abarcando todas las actividades de las estructuras estatales (o potestades delegadas por el estado) dirigidas a promover el cumplimiento (*compliance*) y a alcanzar los resultados esperados de la aplicación de las regulaciones – por ejemplo, la reducción de los riesgos a la seguridad, la salud y el medio ambiente, asegurando (entre otros fines) el logro de ciertos objetivos públicos como la recaudación tributaria, la salvaguarda de ciertos derechos reconocidos legalmente, el funcionamiento transparente de los mercados, etc. Estas actividades pueden incluir información, guía, prevención, recopilación y análisis de datos, inspecciones y la promoción del cumplimiento de las normas (*enforcement*) en su sentido más estricto – es decir, advertencias, avisos para incentivar mejoras, aplicación de multas, denuncias penales, etc. A fin de distinguir ambos significados de *enforcement*, "promoción del cumplimiento de las normas" (*regulatory enforcement*) será entendido en su significado más amplio y "acciones para promover el cumplimiento de las normas" (*enforcement actions*) se usará en su acepción más estricta.

Por "inspección" se entenderá cualquier tipo de visita o acción de verificación llevada a cabo por funcionarios autorizados para ello, que recaiga en productos, instalaciones, locales, actividades, documentos, etc.

El "riesgo" será entendido como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso (con el potencial de causar daños), y la magnitud potencial del daño causado (número de personas afectadas y gravedad del daño para cada una de ellas).

*Fuente*: OECD (2014[1]), *Regulatory Enforcement and Inspections*, OECD Best Practice Principles for Regulatory Policy, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/9789264208117-en.

# Criterio 1. Cumplimiento basado en evidencia[1]

*Las inspecciones y la promoción del cumplimiento de las normas deben basarse en evidencia y usar indicadores: la toma de decisiones acerca de qué y cómo se debe inspeccionar debe fundamentarse en datos e información y los resultados deben ser evaluados con regularidad.*

**Preguntas clave:**

- ¿Durante el proceso de Análisis de Impacto Regulatorio y en las evaluaciones ex post de la regulación, se revisan los aspectos vinculados a las inspecciones y a las acciones de promoción del cumplimiento de las normas?
- ¿Las potestades atribuidas a las instituciones encargadas de hacer cumplir las regulaciones y de efectuar inspecciones reflejan las metas establecidas por el gobierno en términos de reducción de riesgos y del logro del interés público?
- ¿Los indicadores y los datos empleados para evaluar el desempeño de las instituciones encargadas de hacer cumplir las normas y efectuar inspecciones se enfocan también en resultados tales como la reducción de los riesgos, crecimiento económico, bienestar social, etc.?
- ¿Se implementan en la práctica evaluaciones de efectividad y tienen consecuencias reales en términos de las estructuras, métodos, recursos y herramientas vinculadas al desarrollo de las inspecciones y la promoción del cumplimiento de las normas?

[1] Es decir, tomando en consideración los mejores estudios, datos disponibles y los resultados del análisis de impacto, análisis costo-beneficio, evidencia empírica de campo y otra evidencia relevante.

### *Subcriterio 1.1.* ***Durante el proceso de Análisis de Impacto Regulatorio de nuevas regulaciones, se revisan los aspectos vinculados a las inspecciones y a la promoción del cumplimiento de las normas. Además, la promoción del cumplimiento basada en evidencia es un aspecto fundamental – y "anclado" – que debe de revisarse durante el diseño y la evaluación* ex post *de las regulaciones***

Considerar la etapa de implementación y de hacer cumplir las regulaciones en las propuestas normativas es una parte integrante de las "mejores prácticas" del Análisis de Impacto Regulatorio – RIA, por sus siglas en inglés – y del Análisis de Impacto en sentido más amplio.

En principio, las evaluaciones ex post deben tratar cuestiones referidas a la implementación de la regulación en el sentido más amplio. Sin embargo, la evidencia disponible sugiere que no siempre se presta especial atención a estos problemas. Muchos análisis de impacto regulatorio (AIRs) tratan las inspecciones y la promoción del cumplimiento como algo dado, algo que más o menos automáticamente debe ocurrir (y de manera efectiva), antes que específicamente considerar las diferentes opciones, sus costos y beneficios, así como su efectividad relativa (o la falta de esta). De forma similar, las revisiones ex post por lo general apuntan a los costos y a la efectividad de una norma específica como un todo, sin considerar la parte correspondiente a inspecciones y promoción del cumplimiento con sus particularidades, sin analizar si el diseño, la implementación, las alternativas, etc., fue adecuado. Por otra parte, no siempre se busca la retroalimentación de los mismos inspectores o de los grupos de interés, específicamente en el tema de inspecciones y promoción del cumplimiento.

A fin de obtener el mejor diseño de un sistema de inspecciones y promoción del cumplimiento, y lograr su mejor equilibrio y efectividad; es necesario considerar si para una determinada propuesta normativa realmente se requiere establecer inspecciones y mecanismos de promoción del cumplimiento, y de ser este el caso, establecer su organización, recursos, y métodos a considerar[2]. Estos mismos temas deben ser considerados al realizar las evaluaciones ex post.

- *Evidencia: Lineamientos/procedimientos del RIA, contenido en los RIA publicados*

### *Subcriterio 1.2.* ***Las potestades atribuidas a las instituciones encargadas de hacer cumplir las regulaciones y efectuar inspecciones, reflejan metas en términos de reducción de riesgos y del logro del interés público***

No debe asumirse de manera automática que el hacer cumplir un conjunto dado de normas legales requiere de una institución específicamente encargada de dicha tarea, y que "hacer cumplir la legislación" es una definición de finalidad adecuada. En su lugar, las instituciones empoderadas para inspeccionar y hacer cumplir las normas, deben tener un propósito planteado en términos de qué tipo de daño público van a mitigar o qué resultados positivos contribuirán a lograr. Las instituciones que no puedan definir su misión de esta manera, normalmente generan costos significativos sin beneficios claros y tienen pocos incentivos para mejorar sus enfoques y métodos para el logro de mejores resultados. Tampoco es factible evaluar su desempeño correctamente, ya que este llega a ser definido

[2] Ver, por ejemplo, "Tabla de los Once" de Holanda, www.oecd.org/gov/regulatory-policy/44912386.pdf, en (OECD, 2010[3]).

de modo "circular", es decir, su tarea es inspeccionar y hacer cumplir, y mientras más trabajo hagan, mejor, sin importar cuán beneficioso resulta para el interés público.

Por tanto, es esencial que cada institución o estructura con poderes de inspección y de promoción del cumplimiento tengan atribuciones o potestades claramente definidas en términos de gestión de riesgos[3] y/o de resultados, en pro del bienestar social al cual debe contribuir. Dichas atribuciones pueden ser institucionalizadas de distintas maneras (por general, mediante legislación primaria o secundaria, aunque también complementada con documentos estratégicos aprobados por la autoridad de supervisión, el ministerio, etc.).

- *Evidencia: atribuciones legales establecidas en la legislación respectiva o en documentos oficiales*

### *Subcriterio 1.3.* ***Los indicadores y los datos empleados para evaluar el desempeño de las instituciones encargadas de hacer cumplir las normas y efectuar inspecciones se enfocan también en resultados tales como la reducción de los riesgos, crecimiento económico, bienestar social, etc.***

El uso de indicadores, como el número de inspecciones o de incumplimientos detectados (y sus respectivas sanciones), generan incentivos perversos para las instituciones encargadas de hacer cumplir las normas, debido a que estas tienen un incentivo para un nivel de cumplimiento bajo, lo que implica más volumen de inspecciones – en contra de su misión. El desempeño debe ser medido en términos del logro de bienestar social (seguridad, salud, protección ambiental, etc.) y, como paso intermedio hacia esas metas, mejorar el cumplimiento. Es indispensable que ello sea definido como una tarea esencial y como indicador para las autoridades de inspección y de promoción del cumplimiento.

Así como las atribuciones establecidas para las instituciones encargadas de hacer cumplir las normas deben corresponder con mejoras en el bienestar social y reducciones en los niveles de riesgo, los objetivos e indicadores específicos definidos para medir el desempeño deben partir de un enfoque similar. Para cada área encargada de las inspecciones y de la promoción del cumplimiento de las normas se pueden identificar indicadores clave que se correlacionan significativamente con sus atribuciones. Esto puede hacerse, en primer lugar, definiendo "metas", "objetivos" o "áreas de prioridad" de alto nivel (dado que muchas de las instituciones son responsables de un campo regulatorio muy amplio que abarca varios aspectos), y, dentro de cada una de ellas, objetivos e indicadores específicos que midan

[3] A fin de determinar la importancia relativa de los distintos riesgos, la pertinencia de distintos métodos, la efectividad potencial y real de las acciones, es esencial tomar como base, en la medida de lo posible, pruebas científicas confiables. Cuando lo científico no resulta suficientemente concluyente, y la incertidumbre es significativa, las decisiones que se tomen acerca de la evaluación de los riesgos, elección del enfoque, asignación de recursos, etc., deben ser transparentes acerca de dicha incertidumbre y de las elecciones que se haya tomado. De manera similar, si se llega a la decisión de tratar un problema específico con mayor o menor intensidad de lo que su nivel de riesgo estimado con base en evidencias científicas podría garantizar, debe haber completa transparencia y claridad en los valores sobre los cuales se basó dicha decisión, y qué compromisos fueron aceptados al tomar aquella decisión. La ciencia no puede ser la única guía en la toma de decisiones de política, y la incertidumbre muchas veces hace que sea indispensable hacer juicios, pero teniendo en cuenta que la claridad es esencial acerca de los valores, los criterios y los compromisos para asegurar que las decisiones sean tomadas basadas en evidencias y que puedan ser adecuadamente sopesadas por los grupos de interés. Se deberá entender por "ciencia" no sólo a las ciencias naturales, sino también a las ciencias sociales.

hasta qué punto dichos objetivos se vienen logrando. Debido a la cantidad de problemas involucrados a la hora de medir adecuadamente los resultados de las actividades de inspecciones y promoción del cumplimiento (problemas de atribuciones, de calidad de los datos en ciertos casos, dificultad para medir ciertos resultados, vigilancia ambiental, diferencia de tiempo entre actividades y resultados, etc.), en la práctica, se les puede complementar con ciertos indicadores relativos a los niveles de cumplimiento (en particular las reducciones de incumplimientos, especialmente entre los grupos de alto riesgo).

- *Evidencia: indicadores de desempeño adoptados y publicados de manera oficial*

### *Subcriterio 1.4.* ***Las evaluaciones de efectividad se implementan en la práctica y tienen consecuencias reales en términos de las estructuras, métodos, recursos y herramientas vinculadas al desarrollo de las inspecciones y la promoción del cumplimiento de las normas***

A fin de que las inspecciones y actividades de promoción del cumplimiento de las normas estén verdaderamente basadas en evidencia, se debe llevar a cabo con regularidad evaluaciones de efectividad de las prácticas existentes y se deben tomar acciones de mejora sobre la base de esas evaluaciones. Dichas evaluaciones deben considerar la evolución de los indicadores de desempeño a lo largo de los años, las tendencias de mejora o de empeoramiento de los indicadores claves en el tiempo (en caso hubiere puntos de inflexión), la comparación con otras jurisdicciones (atendiendo tanto al nivel de los indicadores como a las tendencias relativas) y estudios específicos relevantes (que podrían incluir encuestas representativas a empresas u otros grupos de interés, por ejemplo, estudios epidemiológicos), así como instrumentos “cualitativos” (consultas a diversos grupos de interés, etc.).

Si los resultados de las evaluaciones muestran carencias en las instituciones o en el sistema, falta de cumpliendo de los objetivos y/o costos muy elevados, la satisfacción de los interesados es muy baja, etc., se deben plantear e implementar cambios en los aspectos que se han identificado como debilidades (estructuras institucionales, legislación, procesos, enfoques, herramientas, etc.).

- *Evidencia: Políticas oficiales en materia de evaluaciones, ejemplos de evaluaciones públicas e informes de seguimiento*

# Criterio 2. Selectividad

*En la medida de lo posible, la promoción del cumplimiento y la aplicación de las normas deben ser tareas dejadas a las fuerzas del mercado, al sector privado y a la sociedad civil: las inspecciones y la promoción del cumplimiento de las normas no pueden llevarse a cabo en todos los entes regulados ni pueden atender todas las situaciones. Además, existen muchas otras formas de lograr los objetivos de las normas y su cumplimiento.*

**Preguntas clave:**

- ¿En el proceso de Análisis de Impacto, se consideran realmente las opciones y alternativas a las tareas de hacer cumplir las normas dirigidas por el Estado?
- ¿Existen mecanismos institucionales para poner en práctica las alternativas a las tareas de hacer cumplir las normas dirigidas por el Estado, en caso que sea lo adecuado?

### *Subcriterio 2.1. Alternativas a la promoción del cumplimiento dirigida por el estado son realmente consideradas en el Análisis de Impacto*

Como se estableció en el subcriterio 1.1., es muy importante que los procedimientos de Análisis de Impacto consideren efectivamente los aspectos vinculados a inspecciones y a la promoción del cumplimiento de las normas en las propuestas de modificaciones normativas, y no darlo por sentado. Como parte de ello, dichas propuestas no sólo deben revisar las necesidades de recursos y de arreglos institucionales y métodos para efectuar las inspecciones, sino también las alternativas distintas a las tareas de hacer cumplir las normas dirigidas por el Estado (como, por ejemplo, las fuerzas del mercado, el sector privado o la sociedad civil). En primer lugar, el análisis debe apuntar a determinar si realmente se necesita efectuar inspecciones y acciones para hacer cumplir las normas de manera directa, o si la evidencia sugiere que el cumplimiento (*compliance)* puede lograrse de otra manera (por ejemplo: alta probabilidad de cumplimiento voluntario, posibilidad de confiar en un sistema de seguros, litigios civiles, etc.). En segundo lugar, debe considerar qué estructuras, mecanismos, etc. pueden ser usados para el logro de este objetivo. Y tercero, si estas posibilidades resultan insuficientes, pero si al mismo tiempo se considera que las actividades de inspección y de hacer cumplir las normas de forma directa no son la opción óptima, la evaluación debe apuntar a conocer qué modificaciones se deben hacer (en la legislación, en las instituciones, en recursos, etc.) para hacer posible la mejor solución[1].

[1] Cada vez que se aprueba nueva legislación, es esencial evitar que genere alguna forma de creación más o menos automática de nuevas atribuciones para hacer cumplir las normas, o, lo que es aún más problemático, la creación de una nueva entidad o estructura encargada de efectuar inspecciones y de hacer cumplir las normas. En algunos países, las prácticas legislativas existentes hacen que se agreguen de manera sistemática nuevas atribuciones y responsabilidades cada vez que se adopta nueva normativa. Sin perjuicio de las competencias generales que tiene la policía y el poder judicial de hacer cumplir las normas, dichas prácticas deberían ser discontinuadas, en cuanto a la creación de nuevas responsabilidades relacionadas a la promoción del cumplimiento de las normas.

Como parte del proceso de diseño normativo, los legisladores deben considerar si las tareas de inspección y de promoción al cumplimento de las normas a cargo del Estado son la opción más adecuada; si la nueva legislación ya está cubierta por atribuciones e instituciones que preexisten, y si las atribuciones para hacer cumplir las normas pueden ser fácilmente agregadas a las entidades ya existentes, evitando la fragmentación y logrando una tarea más coherente, no es una opción crear nuevas organizaciones encargadas de hacer cumplir las normas bajo la nueva legislación.

[2] En el caso, por ejemplo, de la seguridad alimentaria, cuando las empresas tienen incentivos para suministrar comida inocua a los consumidores. Por supuesto los consumidores no siempre saben qué alimentos pueden tener efectos adversos en la salud. La información no es perfecta y los incentivos no son absolutos (y en muchas actividades hay un comportamiento esencialmente irracional). Así, un alineamiento de incentivos no significa que las tareas de hacer cumplir las normas ya no sean necesarias. Se debe notar que pueden ocurrir incidentes de seguridad de alimentos en tiempos cortos (por ejemplo, toxicidad aguda, contaminación microbiológica) o de largo plazo (ingesta crónica de metales pesados u otros químicos).

Al considerar si realmente se necesita que la promoción del cumplimiento este dirigida por el Estado, es importante considerar la cuestión de los incentivos para el cumplimiento: en los casos en que los incentivos a las empresas (rentabilidad) están alineados en amplia medida con los objetivos y contenidos de las normas[2], debe haber un mayor escrutinio de la necesidad de recursos destinados a la promoción del cumplimiento en aquellos casos en los que queda claro que los objetivos de la norma impondrán costos adicionales a los administrados y reducirán su rentabilidad (al menos en el corto y en el mediano plazo). Otra consideración clave es la naturaleza del daño potencial que la normativa pretende prevenir. Si el daño puede ser remediado a un costo razonable, (es decir, la remediación no es imposible, y no es mucho más cara que la prevención), las tareas de hacer cumplir las normas pueden resultar ser menos necesarias que cuando el daño es muy costoso o imposible de remediar (daño irreversible).

- *Evidencia: Lineamientos de RIA, contenidos de RIA ya publicados*

### *Subcriterio 2.2.* ***Existen mecanismos institucionales para poner en práctica alternativas a la promoción del cumplimiento dirigidas por el Estado, en caso que sea lo adecuado***

Las alternativas distintas a la actividad de hacer cumplir las normas por parte el Estado no son siempre preferibles – ya sea que se trate de cumplimiento voluntario (con esquemas para incentivar dicho cumplimiento, como certificación voluntaria, sanción social, etc.), seguro obligatorio, acción de clase, acciones civiles por parte de litigantes individuales (sin acciones de clase). Todas estas modalidades tienen fortalezas, debilidades, costos, beneficios, y limitaciones. Por ejemplo, las certificaciones emitidas por terceros en combinación con seguros obligatorios, limitada por juicios civiles entre aseguradores y asegurados, han probado ser efectivas en ciertos contextos[1], pero requieren una compleja combinación de infraestructura legal con un sólido mercado de seguros, actores bien informados y costos reales (certificaciones emitidas por terceros, máximos asegurables, experticia, juicios, etc.). Otro ejemplo: varios estudios muestran que las acciones de clase tienen poca efectividad para cambiar el comportamiento corporativo y mejorar el cumplimiento; sin embargo, otros casos relevantes sugieren que pueden tener cierta efectividad en algunos escenarios. En todo caso, estas modalidades muchas veces generan una distribución de costos y beneficios menos que óptima, aunque pueden llegar a ser la mejor opción disponible en ciertos contextos (dificultad de evaluar la ubicación de los riesgos, riesgos difusos e inciertos, alto costo de inspecciones directas y de tareas para hacer cumplir las normas con beneficios inciertos, etc.).

Lo que importa, en todos los casos, es crear las estructuras adecuadas legales e institucionales de manera que se pueda emplear uno u otro de estos mecanismos en los casos en que cada uno ofrezca la mejor combinación de efectividad y eficiencia.

Las opciones distintas a las inspecciones y tareas para hacer cumplir las normas por parte del Estado a menudo se agrupan en dos categorías (combinables entre sí): certificaciones obligatorias emitidas por terceros y/o seguros, y enfoques basados en litigación (en especial "acciones de clase"). Sin embargo, hay otras opciones "innovadoras", no necesariamente porque rompan esquemas, sino porque aún no están muy difundidas o no se las considera opciones distintas a la promoción del cumplimiento. Entre otras, puede mencionarse: "co-regulación", en que las autoridades limitan la regulación a la directamente

[1] Normas de construcción en Francia.

implementada por los privados (y el Estado actúa como garante, con la potestad de intervenir en caso sea necesario, pero sin involucrarse directamente), esquemas de empoderamiento de los consumidores (por ejemplo, aumentando la transparencia en la información de parte de los operadores privados, con esfuerzos activos para que la información sea más clara y de fácil acceso y comprensión[2]), etc. Para que dichos esquemas resulten efectivos, se necesita emplear recursos adecuados (por ejemplo, para la información) y también fundamentos legales (responsabilidad de actores privados que pudieran incumplir las reglas). Los sistemas que hacen uso extensivo de dichas herramientas en casos en que los costos de hacer cumplir las reglas directamente sean claramente mayores que los beneficios, serán más eficientes y efectivos que otros.

- *Evidencia: Habilitar legislación, por ejemplo, para accionar de manera colectiva, seguros obligatorios, responsabilidad de operadores económicos, etc. Ejemplos prácticos de dichos esquemas*

[2] Escalas de higiene alimentaria, como en Dinamarca, Reino Unido, etc.

# Criterio 3. Enfoque de riesgo y proporcionalidad

*La promoción del cumplimiento de las normas debe basarse en un enfoque de riesgo y ser proporcional a los riesgos involucrados: la frecuencia de las inspecciones y los recursos a emplearse deben ser proporcionales al nivel de riesgo y las acciones de cumplimiento de las normas deben dirigirse a la reducción de los riesgos reales derivados de las infracciones.*

**Preguntas clave:**

- ¿Permite la legislación un enfoque de riesgo y proporcionalidad y exige que sea la base para el desarrollo de las actividades de cumplimiento de las normas y de inspecciones?
- ¿Existe un enfoque común para la evaluación y la gestión de riesgos o para prácticas similares que tengan este enfoque en los distintos campos regulatorios?
- ¿Las inspecciones se llevan a cabo de manera proactiva, se escogen los objetivos de las inspecciones sobre la base del nivel de riesgo? ¿Se incluyen los reclamos y las inspecciones reactivas?
- ¿Las decisiones relacionadas a la promoción del cumplimiento de las normas están basadas efectivamente en la proporcionalidad de los riesgos?
- ¿Se comunica con claridad y de manera activa a los grupos de interés la estrategia de gestión de riesgos y el enfoque de promoción del cumplimiento basado en riesgos, con el objetivo de gestionar adecuadamente las expectativas y mejorar los resultados?

### *Subcriterio 3.1.* ***La legislación relevante permite un enfoque de riesgo y de proporcionalidad y exige que sea la base para el desarrollo de las actividades de cumplimiento de las normas y de inspecciones***

Para que las inspecciones y la promoción del cumplimiento de las normas estén efectivamente basadas en un enfoque de riesgos y proporcionalidad, se necesita, en primer lugar, que la legislación lo permita. En varios países, el lenguaje jurídico y/o la interpretación de las normas hace difícil emplear adecuadamente el enfoque de riesgo, ya que se entiende que cada norma debe hacerse cumplir completamente, sin posibilidad de discreción sobre dónde hacerlo y qué respuestas esperar. En la práctica, la evidencia señala que no es posible que las inspecciones abarquen de manera efectiva todo el universo y de que las decisiones acerca sobre cómo hacer cumplir las normas se toman con algún grado de discreción (dado que siempre hay algún grado de discreción al determinar si existe una violación y en qué consiste esta). Sin embargo, estos arreglos legales hacen que sea difícil para las instituciones a cargo de inspecciones y de la promoción del cumplimiento de las normas, desarrollar enfoques basados en riesgos en los que se acepta y se regula la discrecionalidad – aunque en la práctica se permiten moverse desde una manera arbitrariamente selectiva (debido a la falta de tiempo y de recursos) hacia una selectividad discrecional en función a determinados criterios (basado en riesgos).

La primera necesidad es, entonces, una legislación que permita, de manera clara y explícita, la selectividad en las acciones de inspección (y que no requieran un control universal) y la diferencia en las respuestas sobre cómo hacer cumplir la regulación (permitiendo la adaptación a las circunstancias y la proporcionalidad, siempre y cuando los criterios sean claros). Además, es incluso mejor si la legislación no sólo permite, sino que exige el uso de enfoques basados en riesgos. La evidencia sugiere que muchas entidades encargadas de las inspecciones y de hacer cumplir las normas son reticentes a reducir sus potestades discrecionales resistiéndose al empleo de enfoques basados en riesgos que reemplazan la discreción ilimitada de los individuos por criterios claros para la focalización y reacción. La existencia de un conjunto de políticas, leyes y reglamentos que regulen dichos conceptos es claramente una buena práctica.

- *Evidencia: Contenido de la legislación de carácter marco o sectorial con referencia a la discrecionalidad y a la proporcionalidad de los riesgos*

### *Subcriterio 3.2.* ***Existe un enfoque común para la evaluación y la gestión de riesgos, o al menos un entendimiento y prácticas similares a lo largo de los distintos campos regulatorios***

El permitir e incluso hacer obligatorio el uso de enfoques basados en riesgos no es suficiente si no hay un entendimiento adecuado de su significado y de cómo implementarlos. El riesgo debe ser comprendido correctamente, como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso, con la magnitud y la severidad potencial de las consecuencias de dicho evento (es decir, “alto riesgo” es muy distinto de “alta probabilidad de incumplimiento”). Por esto es importante tener una definición oficial de riesgo que se aplique de forma transversal a todas las áreas regulatorias. Para poder coordinar acciones de manera más efectiva entre las distintas organizaciones encargadas de las inspecciones, permitir una mejor asignación de recursos en los distintos campos normativos y lograr una proporcionalidad de riesgos más significativa es muy útil tener un enfoque común sobre la evaluación y la gestión de riesgos en todos los sectores del gobierno. Esto debe incluir una definición unificada de ‘riesgo’, así como herramientas y

metodologías comunes para evaluar y calificar los riesgos y para determinar la respuesta apropiada.

Por supuesto, se debe de permitir un grado de adecuación suficiente a las distintas necesidades de las áreas específicas. Si no se comparten totalmente entre las diferentes instituciones o funciones públicas la definición de riesgo, por lo menos debe haber un nivel suficiente de similitud para que exista coherencia en todo el sistema regulatorio.

- *Evidencia: Documentos oficiales sobre evaluación de riesgos y gestión de riesgos*

### *Subcriterio 3.3.* ***La mayoría de las inspecciones se lleva a cabo de manera proactiva, la focalización se basa en el nivel de riesgo, incluyendo los reclamos y las inspecciones reactivas***

El enfoque de riesgo no sólo debe ser estipulado por lineamientos oficiales (y, en lo posible, por la legislación), sino que también debe darse en la práctica. Esto quiere decir que la gran mayoría de inspecciones deben ser proactivas, con su focalización basada en la evaluación de riesgos (la misma que debe depender de datos provenientes de distintos sectores y establecimientos). Los factores de riesgo a tener en cuenta en la determinación de los objetivos de las inspecciones deben incluir, al menos, los riesgos intrínsecos de la actividad, el alcance de las operaciones, factores de vulnerabilidad (ubicación, población atendida) y de ser relevantes, el comportamiento histórico. Incluso al recibir reclamos u otra información, se debe emplear una metodología basada en riesgos para determinar si se llevan a cabo inspecciones reactivas, teniendo en cuenta criterios como: confiabilidad o credibilidad de la información, seriedad del riesgo señalado en el reclamo, registro histórico (reclamos anteriores), etc. Las inspecciones reactivas deben ser la minoría del total, y se debe excluir la respuesta sistemática mediante una inspección (un reclamo, una inspección). Al mismo tiempo, se puede requerir una frecuencia de inspecciones de nivel básico para conservar la credibilidad de la supervisión. Asimismo, eventualmente, se puede necesitar una inspección para proporcionarle al regulador suficiente conocimiento sobre el desarrollo actual del mercado o las iniciativas de una empresa, incluso si la evaluación de riesgos ex ante no obliga a efectuar la inspección.

- *Evidencia: Lineamientos oficiales sobre la focalización de las inspecciones, informes con datos sobre las actividades de inspección y sus objetivos (con datos sobre distintos grupos de riesgo)*

### *Subcriterio 3.4.* ***Las decisiones relacionadas con la promoción del cumplimiento de las normas están basadas efectivamente en la proporcionalidad de los riesgos***

La proporcionalidad de los riesgos al momento de tomar decisiones sobre las tareas de hacer cumplir las normas es al menos tan importante como focalizar las inspecciones con base en la evaluación de los riesgos. Al evaluar la situación en un establecimiento, los inspectores deben considerar, no solamente si hay incumplimientos, sino también si los mismos son parte de un patrón de conducta, si reflejan un comportamiento deliberadamente temerario o si son el resultado de errores que el operador se muestra dispuesto a corregir cuanto antes, y si dichos incumplimientos realmente generan riesgos serios para el bienestar del público (seguridad, salud, medioambiente, etc.) – y, en tal caso, la magnitud de dichos riesgos. En lo posible, debe haber una guía oficial que especifique cómo funciona la proporcionalidad de los riesgos y cómo se deben tomar las decisiones sobre las tareas de hacer cumplir las normas, de modo que se incremente la transparencia y se reduzca la incertidumbre.

- *Evidencia: Lineamientos oficiales sobre la actividad de hacer cumplir la ley de manera proporcional a los riesgos involucrados, informes anuales con datos sobre tales decisiones y análisis y tendencias sobre las mismas*

### *Subcriterio 3.5.* ***La estrategia de riesgos, gestión de riesgos y el enfoque de promoción del cumplimiento basado en riesgos se comunica con claridad y de manera activa a los grupos de interés, con el objetivo de gestionar adecuadamente las expectativas y mejorar los resultados***

La comunicación de los riesgos es esencial para cualquier estrategia de gestión de riesgos. En el caso de las inspecciones y de las tareas para promover el cumplimiento de las normas, esto significa, en especial, transparencia acerca de los criterios de riesgo para legitimar la discrecionalidad, claridad sobre las limitaciones en la prevención de los riesgos para asegurar que las expectativas sean adecuadamente gestionadas y mejor información acerca de cuáles son los riesgos clave para mejorar el cumplimiento y sus resultados. Dicha información debe dirigirse a todos los grupos de interés clave: operadores de las empresas, consumidores, trabajadores, ciudadanos. Un elemento clave de la comunicación de los riesgos es dejar claro que la gestión de los riesgos no puede ser hecha sólo por los inspectores. Información sólida y a disposición es un elemento clave del éxito.

- *Evidencia: Políticas oficiales y evidencias de esfuerzos de comunicación*

# Criterio 4. Regulación responsiva

*El hacer cumplir las normas debe basarse en principios de "regulación responsiva"; es decir, las acciones de promoción del cumplimiento e inspecciones deben ser adecuadas al perfil y al comportamiento de los sujetos regulados.*

**Preguntas clave:**

- ¿La legislación aplicable permite que la promoción del cumplimiento de las normas se haga de manera diferenciada (responsiva) y proporciona un marco apropiado para el ejercicio de la discrecionalidad (permitiéndola dentro de determinados límites y con rendición de cuentas)?
- ¿La graduación de las sanciones disponible es adecuada para disuadir mediante esquemas escalonados (suficientemente "leves" cuando sea necesario y suficientemente "graves" para sobrepasar el beneficio potencial derivado del incumplimiento)?
- ¿Existe una distinción clara y una articulación efectiva entre las actividades que se enfocan en la promoción del cumplimiento (incluyendo, cuando sea necesario, el empleo de las facultades coercitivas) y las actividades para hacer cumplir las normas enfocadas en la lucha contra la criminalidad (llevada a cabo por fuerzas policiales, fiscales, etc.)?
- ¿Las prácticas para hacer cumplir las normas diferencian la respuesta ante el incumplimiento, sobre la base de un registro histórico del comportamiento de los administrados (con tratamiento diferenciado a las nuevas empresas), evaluación de riesgos y de efectividad de las diferentes opciones?

***Subcriterio 4.1.* La legislación aplicable permite (o al menos no prohíbe) que la promoción del cumplimiento de las normas se haga de manera diferenciada (responsiva) y proporciona un marco apropiado para el ejercicio de la discrecionalidad (permitiéndola dentro de determinados límites y la rendición de cuentas)**

Existe evidencia sólida acerca de que la regulación responsiva produce mejores resultados que un esquema de sanciones en el que cada violación es castigada por igual, aunque la ley no siempre lo permite. Por ello, es indispensable que la legislación permita explícitamente respuestas diferentes cuando se trate de promover el cumplimiento de las regulaciones (desde una simple advertencia hasta sanciones mayores e incluso denuncias penales), dependiendo de las circunstancias (riesgo derivado de los incumplimientos, antecedentes y situación del administrado, disposición a cumplir y mejorar la conducta, o la falta de esta, colaboración, obstaculización, etc.). La discrecionalidad en el hacer cumplir la regulación debe estar claramente permitida (dado que de todas maneras existirá en la práctica), pero restringida mediante la aplicación de principios y criterios (en particular, en función a la proporcionalidad de los riesgos). También debe haber requerimientos para que las entidades encargadas de hacer cumplir las regulaciones rindan cuentas y sean responsables de sus decisiones (lineamientos públicos dirigidos a los inspectores acerca de la toma de decisiones, informes anuales sobre las de promoción del cumplimiento de las normas, incluyendo su justificación).

- *Evidencia: contenido de la legislación marco aplicable y/o de la legislación sectorial específica que regula la promoción del cumplimiento de las normas, legislación secundaria y/o lineamientos acerca de cómo ejercerla*

***Subcriterio 4.2.* La graduación de las sanciones disponible es adecuada para disuadir el incumplimiento mediante esquemas escalonados (suficientemente "leves" cuando sea necesario y suficientemente "graves" para sobrepasar el beneficio potencial derivado del incumplimiento)**

A fin de que la promoción del cumplimiento de las normas sea creíble, y para lograr el efecto disuasivo, las potenciales sanciones deben ser suficientemente fuertes para sobre pasar los potenciales beneficios de quienes cometan incumplimientos – deben tener la suficiente flexibilidad, de manera que generen una amenaza creíble de que los inspectores y entidades encargados de hacer cumplir las leyes, realmente harán uso de dichas sanciones. Si hay sanciones muy severas (por ejemplo, el cierre del establecimiento), se emplearán muy rara vez (al menos en la mayoría de los casos) porque las consecuencias económicas y sociales y las potenciales reacciones políticas, serían considerables. La legislación debe pues prever un rango de respuestas diferenciadas, incluyendo, por ejemplo, advertencias simples, notificaciones oficiales para mejoras, inclusión en una lista pública con los resultados de las inspecciones (usando el incentivo de la publicidad negativa para fomentar el cambio de conducta), multas administrativas y hasta denuncias penales, cierre, daños punitivos potenciales o compensación por ganancias indebidas, etc. Al mismo tiempo, las entidades a cargo de la inspección deben asegurarse de llevar a cabos inspecciones de seguimiento para garantizar el total cumplimiento en los casos de aplicación de respuestas más "suaves" (por ejemplo, inspecciones de seguimiento después de emitir una advertencia).

- *Evidencia: Disposiciones en la legislación marco o en la legislación sectorial específica otorgando a los funcionarios la potestad de aplicar sanciones; legislación secundaria y/o lineamientos que establezcan explícitamente la amplitud de las posibles decisiones*

***Subcriterio 4.3.* Existe una distinción clara y una articulación efectiva entre las actividades que se enfocan en la promoción del cumplimiento (incluyendo, cuando sea necesario, el empleo de las facultades coercitivas) y las actividades para hacer cumplir las normas enfocadas en la lucha contra la criminalidad (llevada a cabo por fuerzas policiales, fiscales, etc.)**

A fin de desarrollar un sistema de inspecciones y de promoción del cumplimiento normativo efectivo, eficiente, responsivo, y basado en riesgos, es esencial que sus metas y actividades sean distintas de las del sistema de lucha contra la criminalidad[1]. El primero debe enfocarse en promover el cumplimiento de las regulaciones entre la gran mayoría de administrados – quienes lo hacen ya sea de manera voluntaria o que lo harán gracias a incentivos adecuados (como información, legitimidad de las reglas y de las instituciones, normas sociales y disuasión). En cambio, el segundo de los sistemas se dirige a los delitos y no es reactivo a incentivos – y debe tener a su disposición los instrumentos correctos, que son totalmente diferentes de los del primero. Es importante articular con claridad estas diferencias en la legislación, en las instituciones y en la práctica, a fin de poder desarrollar instituciones encargadas de las inspecciones y de hacer cumplir la normativa que ganen legitimidad entre los administrados, así como su cooperación activa con los sujetos regulados. Es esencial un intercambio de información efectivo y claridad en cómo compartir responsabilidades entre estos dos tipos de promoción del cumplimiento de la ley a fin de atender a todo el espectro de operadores privados, riesgos y violaciones. Las inspecciones regulatorias deben ser claramente distinguibles de las tareas de promoción del cumplimiento de las normas en sentido penal, pero necesitan un vínculo con las tareas de cumplimiento de la ley para evitar vacíos en el sistema[2].

Se puede cumplir con este criterio de varias maneras, pero para ello fundamentalmente se requiere que el objetivo de las entidades encargadas de las inspecciones y de hacer cumplir las normas sea la maximización de los niveles de cumplimiento, y no una sistemática detección y castigo de cada incumplimiento. Por tanto, se requiere que la legislación les otorgue a dichas entidades una discrecionalidad adecuada para manejar distintas situaciones de distintas maneras, incluyendo no sancionar ciertos incumplimientos si se considera que estos plantean un riesgo muy bajo y pueden ser manejadas sin una promoción del cumplimiento formal.

- *Evidencia: Visión, atribuciones de entidades encargadas de las inspecciones y de hacer cumplir la ley (normas legales, documentos estratégicos, informes anuales, etc.)*

[1] Esto no debe ser entendido como que resulta inadecuado que una entidad encargada de inspeccionar y de hacer cumplir las normas tenga poderes de coerción (incluyendo poderes penales en países donde esto sea posible y donde las acciones penales son una herramienta importante de potestades coercitivas). Lo que importa primordialmente es una distinción de misiones y propósitos. Las acciones penales, *como parte de la actividad coercitiva para hacer cumplir las normas*, son una de las herramientas en un marco regulatorio responsivo, donde representa el cumplimiento. En contraste, el propósito específico de la coerción legal, como la ejecutada por las fuerzas policiales y los fiscales en los casos delictivo, es específicamente detectar y sancionar los delitos – y no incrementar los niveles promedio de cumplimiento.

[2] De acuerdo con lo anterior, el vínculo puede ser interno (atribuciones penales "en casa") así como externo (intercambio de información con entidades de cumplimiento de la ley la posibilidad y "escalar" el caso mediante la transferencia de casos a la fiscalía).

***Subcriterio 4.4.* Las prácticas para hacer cumplir las normas diferencian la respuesta ante el incumplimiento, sobre la base del comportamiento histórico de los administrados (con tratamiento distinto a las nuevas empresas), evaluación de riesgos y de efectividad de las diferentes opciones**

En la práctica, el hacer cumplir las normas de manera responsiva requiere diferenciar según el comportamiento histórico del operador, la evaluación de riesgos (daños que el incumplimiento de la norma ha causado o es probable que cause, el contexto integral de cumplimiento del administrado), y la efectividad potencial de la disuasión al aplicar opciones diferentes. Lo anterior implica considerar el impacto de la respuesta para hacer cumplir la regulación en el cumplimiento a futuro, tanto al interior del establecimiento (principalmente respuesta de los empleados y ejecutivos) y fuera de este (efecto ejemplificador a otros agentes del mercado). Dado que no se puede esperar que los inspectores individuales tengan un conocimiento completo de todas las experiencias y evidencias que pueden ser relevantes para escoger entre diferentes respuestas posibles, es indispensable disponer de guías suficientemente detalladas – en combinación con fuertes habilidades profesionales para evaluar adecuadamente la situación in situ. Tener una guía detallada es, en todo caso, insuficiente – es esencial asegurarse de que las prácticas que llevan a cabo los inspectores y las decisiones sobre su manejo correspondan a un enfoque responsivo.

- *Evidencia: Documentos de política oficial, informes anuales, datos y análisis*

# Criterio 5. Visión de largo plazo

*Los gobiernos deben adoptar políticas en materia de inspecciones y promoción del cumplimiento de las normas: se deben establecer objetivos claros, así como mecanismos institucionales con objetivos definidos y un mapa de ruta de largo plazo.*

**Preguntas clave:**

- ¿Se ha adoptado una visión, una estrategia y/o un marco legal oficial para las tareas de promoción del cumplimiento de las normas y las inspecciones, estableciendo metas, objetivos y principios claves?
- ¿Existen mecanismos y prácticas (incluyendo, pero no limitadas a las Evaluaciones de Impacto) para evitar o limitar la ocurrencia de situaciones y decisiones que podrían corresponder a una "regulación responsiva basada en riesgos"?
- ¿La visión de largo plazo tiene efectos prácticos y sirve para guiar reformas, legislación y decisiones clave? ¿Se ha adoptado un marco institucional para contrarrestar los giros en el corto plazo en las políticas?

***Subcriterio 5.1.* Se ha adoptado una visión, una estrategia y/o un marco legal oficial para las tareas de promoción del cumplimiento de las normas y las inspecciones, estableciendo metas, objetivos y principios claves**

Para un desarrollo adecuado del sistema de inspecciones y de promoción del cumplimiento de las normas, se necesita una visión de largo plazo con metas y principios claros para protegerlos de prioridades en conflicto y de corto plazo. Esto puede adoptarse de distintas maneras – mediante programas gubernamentales, legislación, etc. sin embargo, deben de ser suficientemente fuertes y estables para cumplir con el objetivo. Estos documentos deben incluir principios, metas y objetivos que se apliquen a todo el sistema.

- *Evidencia: Documento oficial con la visión y la estrategia oficial u otro marco normativo*

***Subcriterio 5.2.* Mecanismos y prácticas (incluidas, pero no limitadas a las Evaluaciones de Impacto) para evitar o limitar la ocurrencia de situaciones y decisiones que podrían corresponder a una "regulación de riesgos por reflejo"**

La "regulación de riesgos por reflejo" es la descripción breve de un fenómeno muy frecuente: reacciones explosivas frente a un accidente, emergencia o un nuevo riesgo, debido a lo cual las autoridades adoptan nuevas regulaciones de urgencia y desarrollan actividades de inspección y de cumplimiento normativo, sin una consideración adecuada de la extensión del riesgo, la pertinencia de las soluciones propuestas y sus costos.

Esta "reflejo" es impulsado por consideraciones políticas, la necesidad de "que me vean haciendo algo al respecto" y genera costos significativos, consecuencias negativas no deseadas, etc. Un buen sistema de inspecciones y de cumplimiento de normas basado en riesgos debe ser protegido de estas decisiones "por reflejo". Esto, por supuesto, incluye mecanismos de Evaluación de Impactos (que aplican a la elaboración de nuevas normas), pero complementados con medidas (en materia de normas, programas gubernamentales, prácticas, etc.) que excluyan respuestas tipo "regulación de riesgos por reflejo" en la esfera de las inspecciones y de las tareas de hacer cumplir las normas (lo cual podría significar decidir súbitamente efectuar inspecciones a todos los sujetos regulados en un sector específico luego de un accidente, sin considerar la información, los riesgos, etc.).

- *Evidencia: Política oficial o visión de gobierno acerca del manejo de riesgos, en respuesta a incidentes y crisis*

***Subcriterio 5.3.* La visión de largo plazo tiene efectos prácticos y sirve para guiar reformas, legislación y decisiones clave. El marco institucional vigente permite contrarrestar los giros en el corto plazo en las políticas**

No es suficiente tener una visión o una estrategia oficial de largo plazo si ello no se traduce en la práctica. Resulta crucial que los principios y metas señaladas en el documento marco que establece la visión, sean respetadas al adoptar nueva legislación y cuando se realizan cambios institucionales o cuando se tomen decisiones estratégicas en las entidades de inspección. Para lograr esto, es útil tener una institución dedicada a la promoción de la implementación de la estrategia, ayudando a las organizaciones encargadas de las inspecciones a comprender y a aplicar dicha estrategia, y asegurando que esta sea tenida en cuenta en la nueva legislación, las reformas, etc.

- *Evidencia: Mecanismos institucionales adoptados para asegurar la implementación de la visión o la estrategia de largo plazo*

# Criterio 6. Coordinación y consolidación

*Las funciones de inspección deben ser coordinadas y, cuando sea necesario, consolidadas: con menos duplicaciones y superposiciones se asegura un mejor uso de los recursos públicos, minimizando las cargas en los administrados, y maximizando la efectividad.*

**Preguntas clave:**

- ¿La atribución de competencias, la coordinación y la consolidación entre entidades es considerada en las propuestas legislativas y en el proceso de Evaluación de Impactos?
- ¿Se evita la duplicidad de funciones y están claras las atribuciones y las responsabilidades (entre las distintas instituciones, entre el ámbito nacional y local)?
- ¿Las distintas organizaciones de inspección y de promoción del cumplimiento comparten información y registros, participan en sistemas de alerta conjunta y coordinan en el campo, en especial en áreas regulatorias relacionadas?
- ¿Se han adoptado mecanismos para incrementar la eficiencia mediante un mejor intercambio de información, con las distintas entidades actuando como los "ojos y oídos" de las demás entidades? ¿Se evita la re-inspección del mismo problema, así como la duplicidad de informes?
- ¿Se asignan recursos y se efectúa un planeamiento estratégico considerando todas las entidades que trabajan en un área regulatoria determinada?

***Subcriterio 6.1. La atribución de competencias, la coordinación y la consolidación entre entidades son consideradas en las propuestas legislativas y en el proceso de Evaluación de Impactos***

Es esencial evitar la proliferación de distintas instituciones de inspección, asegurar la claridad y la coherencia, previniendo el surgimiento de áreas con competencias en conflicto. Para el logro de este objetivo durante la redacción de propuestas normativas (incluyendo el proceso de Evaluación de Impactos de la regulación), se debe prestar especial atención a qué instituciones u organizaciones ya poseen competencias de inspección y de promoción del cumplimiento de las normas en los campos bajo estudio, quienes estarían a cargo de la implementación de las nuevas regulaciones y asegurando que el resultado sea coherente, claro, y que evite la superposición o la fragmentación.

- *Evidencia: Lineamientos RIA y contenido de los RIAs publicados*

***Subcriterio 6.2. Se evita la duplicidad de funciones y están claras las atribuciones y las responsabilidades (entre las distintas instituciones, entre los niveles nacional y local)***

A fin de que el sistema de inspecciones esté claro a los ojos de los administrados, sea eficiente (sin duplicación de costos o cargas) y efectivo (sin dispersión de información y de esfuerzos y sin problemas de coordinación), las funciones deben estar lo más unificadas posibles – únicamente – una institución responsable de un área regulatoria entera (por ejemplo, la seguridad alimentaria, la seguridad de los productos, etc.) o por lo menos de un área regulatoria en un sector específico (por ejemplo, la producción de alimentos básicos). Cuando hay varias instituciones involucradas o cubren áreas que se encuentren relacionadas (por ejemplo, salud pública e higiene pública, la salud ocupacional, medioambiente) debe haber claridad sobre quién es responsable de regulaciones particulares, de los administrados, etc. Tal claridad debe también estar asegurada entre los distintos niveles territoriales (nacional o federal, regional, local, etc.), de manera que los establecimientos no estén sujetos a inspecciones repetidas (potencialmente contradictorias) y se desperdicien recursos públicos en actividades sin coordinación y duplicadas. Dado que es raro que un sistema de inspecciones y de promoción del cumplimiento sea completamente claro y ágil, considerando que las instituciones se han desarrollado a lo largo de años y, como resultado de iniciativas de política pública separadas, es importante para los gobiernos (o autoridades regionales, en el caso de que tengan la responsabilidad de las inspecciones) emprender iniciativas para revisar las funciones e instituciones existentes y buscar agilizarlas y consolidarlas, o al menos, aclarar los roles y responsabilidades, en caso sea adecuado.

- *Evidencia: Documento general sobre funciones de inspección, iniciativas oficiales para consolidarlas o aclararlas*

***Subcriterio 6.3. Las distintas organizaciones de inspección y de promoción del cumplimiento comparten información y registros, participan en sistemas de alerta conjunta y coordinan en el campo, en especial en áreas regulatorias relacionadas***

Incluso asumiendo una separación óptima de responsabilidades que asegure la máxima claridad, seguirá habiendo distintas organizaciones a cargo de campos regulatorios que son diferentes pero relacionados y en todo caso, la evidencia muestra que el cumplimiento o el incumplimiento en un área es a menudo predictor del cumplimiento o del incumplimiento en otra, de modo que es esencial compartir información para mejorar la focalización basada en riesgos, la eficiencia y la efectividad. Para lograr este objetivo, las buenas prácticas de

inspecciones y de promoción del cumplimiento incluyen sistemas de alerta conjunta[1], intercambio sistemático de información (o como segunda opción, compartir información después de una solicitud) y de registros sobre establecimientos bajo supervisión y coordinación de inspecciones (intercambio de planes, inspecciones conjuntas, etc.).

- *Evidencia: Los sistemas existentes (alerta conjunta, intercambio de información, etc.), mecanismos institucionales, planes de inspección conjuntos*

***Subcriterio 6.4. Se han adoptado mecanismos para incrementar la eficiencia mediante un mejor intercambio de información, con las distintas entidades actuando como los "ojos y oídos" de las demás entidades. Se evita la re-inspección del mismo problema, así como la duplicidad de informes***

Más allá del intercambio de datos y registros formales, las diferentes estructuras de inspección pueden colaborar para incrementar su eficiencia y su capacidad de evaluar los riesgos mediante acuerdos para actuar como "ojos y oídos" para las demás. En algunos casos, puede ser mediante acuerdos de una "entidad líder" que efectuará inspecciones regulares en un sector dado, y convocará a otros en caso de problemas en sus campos de competencia específicos. En otros casos, se puede dar a todos los inspectores en varias (o en todas) las organizaciones un conocimiento básico de otras áreas, de modo que puedan detectar riesgos potenciales mayores durante sus visitas y alertar a las demás organizaciones al respecto.

Además, mejoras adicionales en la eficiencia y reducciones en las cargas pueden ser logradas estableciendo normas y mecanismos que prohíban la re-inspección del mismo asunto por parte de dos entidades distintas y haciendo obligatorio para todas las entidades estatales compartir información (prohibiendo, en consecuencia, los informes duplicados – en algunos países a esta regla se le denomina "se dice una sola vez").

- *Evidencia: Políticas oficiales o memorándums de entendimiento entre entidades, procesos y procedimientos documentados, contenido curricular de las capacitaciones de personal*

***Subcriterio 6.5. La asignación recursos y el planeamiento estratégico se efectúan considerando todas las entidades que trabajan en un área regulatoria determinada***

Como ya se indicó en el Criterio 1, la asignación de recursos de las entidades de inspección y de promoción de cumplimiento de las normas se deben basar en evidencia y, según el Criterio 3, de manera proporcional al riesgo. Al hacer ello, es esencial considerar todas las instituciones, estructuras, niveles, etc., que pudieran participar y no sólo a una sola entidad. En la mayoría de los casos, serán diversas las entidades que participarán en la implementación de las regulaciones en una determinada materia y cuando se evalúen los recursos disponibles y requeridos, es indispensable tener esa mirada amplia y no asignar múltiples recursos para lo que en esencia es el mismo asunto (o muy cercano). Esto quiere decir que, cuando se emprende revisiones o planeamientos estratégicos de largo o mediano plazo (en el nivel que sea que se lleve a cabo) se deben tomar en cuenta a los recursos humanos, su experticia, los recursos técnicos y (de ser posible) la asignación de recursos de todas las entidades involucradas en la supervisión de un área regulatoria dada. Lo mismo

[1] Tal como en RASFF y RAPEX para la Unión Europea en materia de seguridad alimentaria y de los productos.

resulta aplicable cuando se efectúan ejercicios de comparación entre diferentes jurisdicciones: no se pueden hacer comparaciones significativas sin tomar en cuenta un dominio regulatorio completo y no sólo una sola institución, si es que participa más de una[2].

- *Evidencia: Lineamientos sobre planificación/revisiones estratégicas, contenido de documentos de planificación/revisiones estratégicas*

[2] Por ejemplo, en salud ocupacional y seguridad o seguridad alimentaria, muchas veces hay más de una institución involucrada en inspecciones y labores de promoción de cumplimiento. Una revisión adecuada o un ejercicio de planeación necesita al menos tener en consideración todos sus recursos (incluso si el planeamiento no se hace de manera conjunta, al menos debe incorporar la existencia de otras instituciones involucradas).

# Criterio 7. Gobernanza transparente

*Las estructuras de gobernanza y las políticas de recursos humanos para la promoción del cumplimiento de las regulaciones, deben basarse en la transparencia, el profesionalismo y la gestión por resultados. La promoción el cumplimiento de las normas, debe estar libre de toda influencia política y los esfuerzos para la promoción del cumplimiento deben ser recompensados.*

**Preguntas clave:**

- ¿El nombramiento de los directivos de las instituciones encargadas de las inspecciones y de hacer cumplir las normas se hace de manera transparente, basado la competencia profesional, minimizando la interferencia política?
- ¿Las decisiones clave, los cambios en los procesos, procedimientos y estructuras requieren decisiones colegiadas y/o escrutinio externo, evitando el exceso de inestabilidad y de poder directivo discrecional?
- ¿Los grupos de interés son consultados y están representados en los esquemas de gobernanza de las instituciones encargadas de las inspecciones y de promoción del cumplimiento – en especial las más estratégicas?
- ¿Las organizaciones encargadas de las inspecciones y de promoción del cumplimiento cuentan con misiones, atribuciones, procedimientos y mecanismos de financiamiento que excluyen los conflictos de interés y metas en conflicto?
- ¿Las decisiones que se toman en todos los niveles se basan en criterios y procesos transparentes, generando consistencia en las decisiones sobre cumplimiento de las normas y rendición de cuentas institucional?
- ¿Las decisiones estratégicas y cambios requieren aprobación política (legislativa, ejecutiva) mientras que las decisiones operativas se toman de manera independiente y protegidas de interferencias políticas?

***Subcriterio 7.1.* El nombramiento de los directivos de las instituciones encargadas de las inspecciones y de hacer cumplir las normas se hace de manera transparente, con base en la competencia profesional, minimizando la interferencia política**

Los altos ejecutivos y otros directivos de alto rango a cargo de las estructuras de inspecciones y de la promoción del cumplimiento deben ser seleccionados por su competencia profesional, específicamente su capacidad gerencial (y no sólo, o principalmente, como especialistas técnicos en sus respectivas áreas de trabajo). La selección de funcionarios basada en contactos políticos, amiguismo u otros medios similares, debe ser excluida en la medida de lo posible. Para lograr esto, los procesos de selección y de nombramiento deben ser transparentes, con criterios claros, publicitados, a cargo de un comité de selección equilibrado (y no nombramientos a cargo de un solo funcionario sin escrutinio, como comúnmente es el caso). Se debe tomar toda precaución posible para minimizar la interferencia política.

- *Evidencia: Políticas y procedimientos para contratación de funcionarios de alto rango*

***Subcriterio 7.2.* Las decisiones clave y los cambios en los procesos, procedimientos y organizaciones requieren decisiones colegiadas y/o escrutinio externo, evitando el exceso de inestabilidad y de poder directivo discrecional**

Incluso con el mejor proceso de selección de los directivos, asegurar la continuidad de las prácticas institucionales, el profesionalismo, enfoque estratégico requiere que los funcionarios de alto rango tengan sólo atribuciones limitadas para imponer cambios unilaterales en las políticas de inspección y promoción del cumplimiento. Los cambios significativos, por ejemplo, en la estructura interna, metas estratégicas, indicadores, gestión de riesgo y estrategias de cumplimiento, etc. deben requerir de decisiones tomadas por órgano colegiado – de preferencia externo e independiente.

- *Evidencia: Normas legales y otros documentos oficiales que establecen la gobernanza de las inspecciones y de las instituciones de cumplimiento*

***Subcriterio 7.3.* Los grupos de interés son consultados y están representados en los esquemas de gobernanza de las instituciones encargadas de las inspecciones y de promoción del cumplimiento – en especial las más estratégicas**

La representación de los grupos de interés (empresas, organizaciones de la sociedad civil, etc.) en la junta directiva de las instituciones (u órgano equivalente), tiene un valor agregado considerable ya que asegura mayor transparencia, legitimidad y que la institución permanezca en sintonía con el interés del público. Las consultas a los grupos de interés deben ser la regla, al menos para las decisiones estratégicas (definición de metas e indicadores, adopción de una gestión de riesgos o estrategias de cumplimiento, etc.) – así como es necesario consultar a los interesados en todos los procesos de Evaluación de Impactos de las normas. Las decisiones estratégicas claves en materia de inspecciones y de promoción del cumplimiento tienen, por lo menos, tanta relevancia para los grupos de interés como la tienen las normas o regulaciones y se pueden obtener beneficios a partir de su participación. Esto puede hacerse mediante consultas formales *ad hoc* y/o mediante representantes permanentes en el órgano directivo.

- *Evidencia: Normas legales y otros documentos oficiales que estipulan la gobernanza de las instituciones de inspecciones y de cumplimiento, informes anuales*

***Subcriterio 7.4. Las organizaciones encargadas de las inspecciones y de promoción del cumplimiento cuentan con misiones, atribuciones, procedimientos y mecanismos de financiamiento que excluyen los conflictos de interés y metas en conflicto***

Existen diversas maneras en que las atribuciones y los objetivos, o los mecanismos de financiamiento, pueden crear conflictos de interés para las inspecciones y la promoción del cumplimiento. Por ejemplo, si el financiamiento está relacionado con el número de inspecciones, la entidad tendrá un incentivo para aumentar el volumen de visitas, sin tener en cuenta el factor riesgo, la eficiencia y la efectividad. Si una entidad se encarga tanto de emitir licencias, como de verificar el cumplimiento, pero la emisión de las licencias le genera ingresos, tendrá entonces, al momento de emitir una licencia, un incentivo para no considerar aspectos relacionados con el cumplimiento, poniendo en riesgo la seguridad u otros intereses públicos. Si una entidad proporciona servicios con un costo, competitivos (en los que compite con otros proveedores) y, además, tiene atribuciones de promoción del cumplimiento, poseerá una ventaja indebida sobre sus competidores, ya que puede presionar a los administrados a contratar sus servicios. Finalmente, cuando la misma entidad tiene varias metas no relacionadas entre sí y que compiten por los mismos recursos, es esencial que haya orientación de parte del más alto nivel sobre cómo asignar recursos entre ellas. Si una de sus metas requiere la cooperación de los administrados mientras que otra puede generar conflictos con los mismos (debido a un alineamiento diferente de los incentivos), podría ser necesario evaluar cuál es la mejor manera de manejar esta contradicción interna (dividiendo funciones o equipos, priorizando una de las metas, o cambiando los métodos). Si se asignan objetivos en conflicto a instituciones separadas que deberían en teoría coordinar entre sí, también es necesario evaluar cómo manejar dicho conflicto.

- *Evidencia: Legislación, documentación oficial (normas legales, etc.), presupuestos, informes anuales*

***Subcriterio 7.5. Las decisiones que se toman en todos los niveles se basan en criterios y procesos transparentes, generando consistencia en las decisiones sobre el cumplimiento de las normas y rendición de cuentas institucional***

Las decisiones reservadas y confidenciales deben ser evitadas. Es esencial que todas las decisiones estén fundamentadas en criterios claros (por ejemplo, proporcionalidad del riesgo), procesos transparentes, con posibilidades de apelación, etc. El objetivo no es sólo asegurar la consistencia entre las distintas organizaciones, regiones, etc., sino también la rendición de cuentas, permitiendo la evaluación de los resultados de las decisiones, conociendo quién las toma, sobre qué base, etc.

- *Evidencia: Lineamientos oficiales e informes anuales*

***Subcriterio 7.6.* Las decisiones estratégicas y cambios requieren aprobación política (legislativa, ejecutiva) mientras que las decisiones operativas se toman de manera independiente y protegidas de interferencias políticas**

Las decisiones estratégicas incluyen la definición de metas y objetivos de la institución, los indicadores de desempeño, estrategias de riesgos y de promoción de cumplimiento, documentos metodológicos (evaluación de riesgos y focalización, gestión de las tareas de promoción de cumplimiento, listas de verificación, etc.), organización, asignación de recursos, términos de referencia para el equipo de profesionales, etc. Lo usual es que todo ello deba ser aprobado por los poderes ejecutivo o legislativo, según corresponda. Sin embargo, las decisiones operativas, que implementan dichas decisiones estratégicas (planeamiento y focalización para las inspecciones, asignación de tareas y de personal, decisiones sobre cómo hacer cumplir las normas, etc.) deben quedar en manos de los profesionales y de la dirección de la entidad, sin interferencias de los políticos en el poder (o de otros partidos). Es esencial tener tanto la base legal, como los mecanismos institucionales y las prácticas para estos efectos.

- *Evidencia: Legislación y estatutos oficiales de las entidades encargadas de las inspecciones y de hacer cumplir las normas, informes anuales*

# Criterio 8. Integración de la información

*Se deben emplear tecnologías de la información para maximizar el enfoque de riesgos, la coordinación y el intercambio de información – así como el uso óptimo de los recursos.*

**Preguntas clave:**

- ¿Las organizaciones encargadas de las inspecciones y de hacer cumplir las normas poseen información y herramientas de TICs actualizadas que permiten un planeamiento efectivo basado en riesgos y seguimiento de inspecciones previas?
- ¿Se comparte la información entre las distintas organizaciones y/o es sencillo hallar los registros de las otras organizaciones – o aún mejor, la información está completamente integrada (base de datos única) entre las diferentes estructuras?
- ¿Los sistemas de información hacen uso de técnicas avanzadas de información como planeamiento automatizado, gestión integrada de recursos, herramientas móviles para inspectores, SIG, etc.?
- ¿El intercambio de información va más allá de los campos vinculados a inspecciones y promoción del cumplimiento e incluye el registro de empresas, licencias, salud pública, etc.?

***Subcriterio 8.1.* Las estructuras encargadas de las inspecciones y de hacer cumplir las normas poseen información y herramientas de TICs adecuadas y actualizadas, lo que permite efectuar un planeamiento y un seguimiento de las inspecciones anteriores, efectivos y con base en los riesgos**

Tanto la focalización con base en riesgo, como la promoción de cumplimiento efectiva, requieren información y herramientas de gestión de información. Para lo primero, es indispensable contar con una base de datos de los administrados bajo supervisión, incluyendo sus características fundamentales en relación con el riesgo (actividades, alcance, ubicación, registro histórico). Para lo segundo, un adecuado recurso es un sistema de gestión de casos, de registros y de flujograma. Una combinación de ambos es la mejor opción para asegurar eficiencia y focalización óptimos.

- *Evidencia: Existencia de sistemas TIC, disponibilidad de funciones y de datos*

***Subcriterio 8.2.* Se comparte información de forma regular entre distintas estructuras y/o los registros de otras instituciones son de fácil acceso – o mejor aún, los datos están completamente integrados (base de datos única) y se comparten entre distintas estructuras**

Como ya se indicó en los sub criterios 6.3 y 6.4, un intercambio rápido y regular de información es esencial. Los sistemas TICs deben ser configurados para que estos procesos se den de la manera automática posible, o al menos, de manera muy sencilla. De manera ideal, varias (o todas) las entidades deberían usar la misma base de datos, con distintas agencias responsables de completar los distintos campos, pero también con la posibilidad de que todas puedan consultar los datos de las demás para mejorar el establecimiento de objetivos y el factor responsivo, así como tener datos actualizados juntando su esfuerzo y recursos.

- *Evidencia: Existencia de un sistema para el intercambio de datos o integración de datos*

***Subcriterio 8.3.* Los sistemas de información hacen uso de técnicas avanzadas como planeamiento automatizado, gestión de recursos integrados, herramientas móviles para inspectores, SIG, etc.**

Para hacer que el establecimiento de objetivos y el trabajo en general mejoren y sean más eficientes, las herramientas TICs deben utilizar, tanto como sea posible, la planificación automatizada (basada en criterios de riesgo y en el perfil de riesgo de los administrados registrados en la base de datos), herramientas móviles para los inspectores (herramientas basadas en laptops/*tablets*, o teléfonos inteligentes – *smartphones* – incluyendo listas de verificación, aplicaciones móviles u otros instrumentos para registrar directamente lo encontrado en las inspecciones, buscar información adicional, etc.), sistemas de información geográfica (SIG) para analizar mejor los datos, identificar patrones y ubicar los establecimientos de los administrados que van a ser visitados. La búsqueda activa de información en redes sociales se hace cada día más relevante.

- *Evidencia: Disponibilidad de funciones de planificación automatizada, herramientas móviles, sistemas SIG, etc.*

***Subcriterio 8.4.* El intercambio de información va más allá de los campos vinculados a inspecciones y promoción del cumplimiento e incluye el registro de empresas, licencias, salud pública, etc.**

La obtención de datos en casos de contaminación, lesiones y otros incidentes, etc., a partir de fuentes como los servicios de salud pública y servicios de emergencia es esencial para mejorar el establecimiento de objetivos con base en riesgos. De manera similar, contar con listas actualizadas de objetos bajo supervisión, requiere una constante interacción con sistemas de registros de empresas, licencias y permisos (por ejemplo, licencias de construcción). Entre más integrados estén estos sistemas y la información requerida esté disponible, más efectivas, y realmente basadas en riesgo, serán las inspecciones.

- *Evidencia: Intercambio de información con otros servicios que no efectúan inspecciones, disponibilidad de datos, existencia de procedimientos, etc.*

## Criterio 9. Procesos claros y justos

*Los gobiernos deben garantizar reglas y los procesos claros para las inspecciones y para la promoción del cumplimiento. Se debe adoptar y publicar legislación coherente y adecuada y articular claramente los derechos y obligaciones de los funcionarios y de las empresas.*

**Preguntas clave:**

- ¿La legislación en materia de inspecciones y promoción del cumplimiento está consolidada en la medida de lo posible y establece derechos, obligaciones, atribuciones y procedimientos con claridad?
- ¿Se encuentra disponible una lista completa de las entidades, organizaciones y funciones, y está claro quién está a cargo de qué sectores y temas?
- ¿La posibilidad de apelar decisiones y formular denuncias es adecuada, publicitada y confiable? ¿Los datos sobre las apelaciones y las denuncias son evaluados con regularidad y son tomados en cuenta?
- ¿Los procesos de toma de decisiones, derechos, obligaciones y facultades de los inspectores están claros para todos, son transparentes y equilibrados? ¿Proporcionan una base sólida para la toma de decisiones basadas en riesgos con una discrecionalidad adecuada pero limitada?

***Subcriterio 9.1.* La legislación en materia de inspecciones y promoción del cumplimiento está consolidada en la medida de lo posible y establece derechos, obligaciones, atribuciones y procedimientos con claridad**

Si bien consolidar la totalidad de la legislación relacionada con las tareas de inspección y de promoción del cumplimiento de la ley es imposible, es útil tener al menos información clave sobre las instituciones, atribuciones de los funcionarios, principios, y procedimientos clave consolidada. Ello permitirá tener mayor claridad y transparencia y también formalizar los mejores principios prácticos (gestión de riesgos, enfoque en el cumplimiento, factor responsivo, etc.) en un único documento.

- *Evidencia: Existencia de legislación que abarque elementos clave de las actividades de inspección y de promoción del cumplimiento de las normas*

***Subcriterio 9.2.* Se encuentra disponible una lista completa de las entidades, organizaciones o sus funciones, y está claro quién está a cargo de qué sectores y temas**

Es esencial tener claro qué instituciones pueden realizar inspecciones y controlar, en qué temas, para fomentar la predictibilidad, para que los administrados puedan ejercer sus derechos y para que el público pueda exigir la rendición de cuentas. Muchas veces esto es casi imposible, debido a la proliferación de organizaciones y potestades. Consolidar esto en un único documento resulta muy útil para todos.

- *Evidencia: Disponibilidad de un listado consolidado de servicios de inspección*

***Subcriterio 9.3.* La posibilidad de apelar decisiones y formular denuncias es adecuada, conocida y confiable. Los datos sobre las apelaciones y las denuncias son evaluados con regularidad y tomados en cuenta**

Las apelaciones de las decisiones de los inspectores se suelen hacer renuentemente porque los administrados temen agravar sus relaciones con instituciones con las que seguirán manteniendo relación mediante futuras inspecciones. Es por ello, entre otras razones, que los procesos de apelación deben ser sencillos dándoles a los administrados la posibilidad de que sus casos sean revisados rápidamente (por ejemplo, mediante tribunales administrativos o similares), con independencia de la administración que tomó la decisión original. De manera similar, debe haber posibilidades de formular denuncias anónimas de manera confiable. De igual modo, los ciudadanos, consumidores, trabajadores, etc., deben poder hacer denuncias públicas y sencillas contra los demás administrados y saber cómo van a ser gestionadas (que, como ya se indicó en el Criterio 3, deben ser revisadas de manera proporcional al riesgo).

- *Evidencia: Descripción de los procesos de apelación y de denuncias, datos acerca del uso de apelaciones y denuncias, evidencia de seguimiento mediante informes anuales y/o documentos estratégicos*

***Subcriterio 9.4.* Los procesos de toma de decisiones, derechos, obligaciones y facultades de los inspectores están claros para todos, son transparentes y equilibrados – proporcionan una base sólida para la toma de decisiones basada en riesgos con una discrecionalidad adecuada pero limitada**

Tanto en la legislación marco para las inspecciones (si es que existe) como en la normativa específica para cada organización de inspección, los procesos de toma de decisiones, atribuciones y derechos de los inspectores (y sus límites), así como los derechos y las obligaciones de los administrados, y los procesos de apelación y denuncias deben estar claros y ser de fácil acceso. Es importante que los inspectores tengan suficientes atributos para cumplir sus tareas de manera efectiva, pero que también existan límites apropiados para evitar abusos y proteger los derechos fundamentales de los administrados. Se debe mencionar explícitamente la proporcionalidad y el riesgo, y aclarar los límites del ejercicio de la discrecionalidad.

- *Evidencia: Procesos, atribuciones y derechos definidos en la legislación primaria y secundaria y en otros documentos oficiales*

# Criterio 10. Promoción del cumplimiento

*Se debe promover la transparencia y el cumplimiento de las normas mediante el empleo de instrumentos adecuados como guías, herramientas y listas de verificación.*

**Preguntas clave**

- ¿La promoción y el apoyo para el cumplimiento de las normas, es considerado como un deber de las organizaciones que tienen a su cargo la realización de inspecciones y de promoción del cumplimiento – evitando el supuesto de que "todos deben conocer la ley", o se considera que las actividades de orientación y acompañamiento deben ser hechas por consultores privados?
- ¿Las instituciones reguladoras, de inspección y de promoción del cumplimiento analizan activamente y con regularidad las barreras al cumplimiento, trabajando para superarlas, en especial las relacionadas con la información?
- ¿La información, orientación y acompañamiento al administrado, son brindados a través de una variedad de herramientas complementarias – documentos y guías claros, prácticos y de fácil acceso – alcance activo – asesoramiento en campo?
- ¿Existe un marco legal para la práctica de "orientación segura" y se emplea – en la medida de lo posible – para incrementar el conocimiento sobre las obligaciones?
- ¿El desempeño de las instituciones a cargo de las inspecciones y promoción del cumplimiento, y el del sistema en general, es evaluado en términos de niveles de cumplimiento (y resultados relacionados con el bienestar público) y no en términos de número de infracciones detectadas (y sancionadas)?

***Subcriterio 10.1.* La promoción y el apoyo al cumplimiento de las normas, es considerado como un deber de las organizaciones que tienen a su cargo las inspecciones y la promoción del cumplimiento, en lugar de seguir un enfoque en el que "todos deben conocer la ley" o que las actividades de orientación y acompañamiento deben ser hechas por consultores privados**

Es frecuente considerar que el deber de conocer la ley recae sólo en los sujetos regulados; sin embargo, este concepto tiene su origen en un periodo en el que la cantidad y la complejidad de las regulaciones era una fracción de lo que son hoy en día. De igual modo, la ausencia de esfuerzos para informar a los administrados y promover el cumplimiento de las normas entre estos, mediante consejería clara y práctica es justificada con el argumento de que dichas actividades de consejería/asesoría deben estar a cargo de consultores privados. Ninguno de estos argumentos es válido.

En tiempos en que el Estado, como respuesta a nuevos riesgos y demandas, ha impuesto numerosas y complejas regulaciones, resulta inadecuado asumir que las empresas o los ciudadanos se pueden informar por sí solos y entender lo que se espera de ellos sin ayuda. Más bien, la promoción y el apoyo al cumplimiento debe ser una prioridad y una función clave en las organizaciones de inspección y de promoción del cumplimiento lo que debe estar establecido en la legislación y en las atribuciones de estas diferentes organizaciones, y se deben asignar recursos significativos para desarrollar y difundir consejería e información en favor de los administrados, en especial para aquellos que no poseen los recursos para obtener y entender la información por sí mismos (por ejemplo, las micro empresas).

- *Evidencia: Visión gubernamental acerca de las inspecciones, legislación marco, documentos estratégicos, etc.*

***Subcriterio 10.2.* Las instituciones reguladoras, de inspección y de promoción del cumplimiento analizan activamente y con regularidad las barreras al cumplimiento, trabajando para superarlas, en especial las relacionadas con la información**

La mejora en el nivel de cumplimiento de las normas requiere el análisis de lo que lo limita – lo cual puede ser falta de información y de comprensión, recursos insuficientes, o un mal diseño regulatorio. Las organizaciones encargadas de las inspecciones y de hacer cumplir las normas deben retroalimentar a los hacedores de política pública sobre dicho diseño y sobre el tema de los recursos. Los hacedores de política pública pueden enfrentar directamente los vacíos en la información. Así, la revisión y la evaluación de las barreras al cumplimiento (usando los hallazgos de sus propios inspectores) es esencial y debe ser una actividad central.

- *Evidencia: Informes anuales y documentos de estrategia*

***Subcriterio 10.3.* La información, orientación y acompañamiento al administrado, son brindados a través de una variedad de herramientas complementarias – documentos y guías claros, prácticos y de fácil acceso – alcance activo – asesoramiento en campo**

Se necesita usar diferentes canales para diferentes problemas y audiencias, y las entidades a cargo de las inspecciones deben usar todas ellas de manera activa. Se deben preparar documentos prácticos y claros para abarcar de la manera más amplia posible las actividades empresariales, los temas regulatorios y los riesgos claves – y difundirlos de manera activa, inclusive mediante portales de internet consolidados (la información dispersa es muchas

veces imposible de hallar). Involucrarse activamente con las nuevas empresas, las asociaciones, los sectores en los que se aprecia la mayoría de las dificultades, etc., mediante visitas, conferencias, información en línea, etc. Las visitas de inspección son un momento clave para informar, explicar y aconsejar.

Se deben elaborar guías con mucho cuidado. Las guías no deben divergir de la ruta establecida en la regulación marco. Se debe asegurar la correlación entre las guías y la regulación marco. Las guías, los manuales y listas de verificación no deben constituir un exceso de implementación de la legislación marco.

- *Evidencia: Existencia de documentos de guía, portales de difusión – informes anuales sobre actividades de difusión*

### *Subcriterio 10.4.* ***Existe un marco legal para la práctica de "orientación segura" y se emplea, en la medida de lo posible, para incrementar la certeza regulatoria***

La práctica "orientación segura" consiste en dar garantías legales a los administrados de que, si ellos siguen las recomendaciones emitidas oficialmente por el regulador, no estarán incumpliendo sus deberes, incluso si más adelante otro funcionario llegara a una conclusión distinta. Cuando mucho, si se considera que el consejo inicial era incorrecto (o si las reglas hubieran cambiado), el administrado tendrá que adecuar su comportamiento, pero no enfrentará responsabilidades ni sanciones. Dichas prácticas existen en varios países con nombres distintos[1], pero muchas veces no se ejerce o puede ser imposible o muy difícil de aplicar, debido a estipulaciones legales en conflicto. Por ello es muy recomendable darle una base legal muy sólida e incluso hacer de ella un requisito legal para las entidades inspectoras que sus consejos/asesorías sean vinculantes para ellos mismos[2]. Sin embargo, esta práctica debe ser diseñada de tal manera que no limite la voluntad de los inspectores de compartir su opinión en comunicaciones más informales con los administrados. Asimismo, el proporcionar este tipo de consejo no debe eliminar la responsabilidad de los administrados de hacer su propia evaluación acerca de la mejor manera de cumplir con las normas regulatorias. Al obtener una "orientación segura", los administrados no necesitan seguir consejos provenientes de otras fuentes que puedan entrar en conflicto. Por tanto, la "orientación segura" debe estar disponible para otras entidades promotoras de cumplimiento – por ejemplo, mediante un sistema compartido de información. Si bien es muy difícil que todos los consejos sean de "orientación segura", la meta debe ser mejorar la certeza regulatoria y los niveles de cumplimiento mediante fuertes incentivos para que los administrados soliciten orientación y la sigan. Debe quedar claro cuándo el inspector brinda un consejo general y cuándo entrega una "orientación segura".

- *Evidencia: Legislación marco u otra legislación primaria (o, en su ausencia, la legislación secundaria), previendo la posibilidad de dar "orientación segura" – existencia de mecanismos institucionales para proporcionarlos*[3]

[1] Por ejemplo, el "*rescript fiscal*" en Francia en materia tributaria, https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroit/f13551.

[2] Como en el caso de Lituania (Ley de la Administración Pública).

[3] Por ejemplo, el esquema de la "Autoridad principal" en el Reino Unido.

# Criterio 11: Profesionalismo

*Los inspectores deben ser capacitados y dirigidos de manera que se asegure su profesionalismo, integridad, consistencia y transparencia. Todo ello exige un entrenamiento sustancial, con un enfoque no sólo en lo técnico, sino también en destrezas generales relacionadas con las inspecciones, además de guías oficiales para os inspectores a fin de asegurar la consistencia e imparcialidad.*

**Preguntas clave**

- ¿La profesión de "inspector"[1] se encuentra definida como una combinación de capacidades técnicas (propias del campo) y competencias "centrales" vinculadas con gestión de riesgos, promoción del cumplimiento, etc.? ¿El profesionalismo es la base para el ejercicio de la discrecionalidad basada en riesgos?
- ¿La capacitación de los inspectores y del equipo de promoción del cumplimiento es realizado, desde la etapa de contratación y durante su carrera en el trabajo, para asegurar conocimientos actualizados y métodos adecuados?
- ¿Se evalúan con regularidad las competencias de los profesionales y las capacidades de la organización? ¿Se hacen esfuerzos para mejorarlos continuamente?

[1] La denominación puede variar de país en país.

***Subcriterio 11.1.* La profesión de "inspector" se encuentra definida como una combinación de capacidades técnicas (propias del campo) y competencias "centrales" vinculadas a la gestión de riesgos, promoción del cumplimiento, etc. El profesionalismo es la base del ejercicio de la discrecionalidad basada en riesgos**

La actividad de inspección y de hacer cumplir las normas es una profesión, la cual es distinta a ser un especialista técnico (de temas ambientales o de salud, por ejemplo). Aunque se requiere tener conocimientos y habilidades técnicas, estos son sólo una parte de lo que se necesita. Definir la profesión de inspector como una distinta a la de un especialista técnico, es un elemento importante, y que implica definir cuáles son las competencias necesarias para ser un inspector: comprensión y gestión de riesgos, comunicación y orientación, promoción y apoyo al cumplimiento de las obligaciones, habilidades de investigación, etc. Sólo los inspectores profesionales con una comprensión clara de su misión y de las herramientas que pueden ser usadas para cumplirla (así como de sus limitaciones) pueden ejercer la discrecionalidad adecuadamente. En tal sentido, el marco para la profesión del inspector debe estar establecido oficialmente y constituir la base para las prácticas de reclutamiento, descripciones de puestos, capacitaciones y evaluaciones de desempeño.

- *Evidencia: Documentos oficiales que definen el rol de los inspectores, elementos centrales requeridos para su calificación profesional*

***Subcriterio 11.2.* La capacitación de los inspectores y del equipo de promoción del cumplimiento es realizado, desde la etapa de contratación y durante su carrera en el trabajo, para asegurar conocimientos actualizados y métodos adecuados**

Con base en el marco profesional descrito anteriormente, se necesita desarrollar y llevar a cabo la capacitación del equipo inspector, tanto al inicio (antes o después del reclutamiento) y también durante su carrera. La capacitación inicial puede ser efectuada en un contexto universitario (con cursos específicos) o en otro tipo de institución, existiendo una diversidad de enfoques aplicables para ello. Lo crucial es que los inspectores reciban tanto el entrenamiento técnico adecuado (y actualizaciones regulares), como capacitación sus funciones y cómo ejercitarlas mejor (actualizaciones acerca de nuevos métodos, etc.).

- *Evidencia: Documentación oficial acerca del entrenamiento (incluye currículos, reportes anuales)*

***Subcriterio 11.3.* Se evalúan con regularidad las competencias de los profesionales y las capacidades de la organización. Se hacen esfuerzos para mejorarlos continuamente**

Exigir competencias y proporcionar capacitaciones es insuficiente sin una evaluación periódica. Esto debe utilizarse para identificar brechas, necesidades y lograr mejoras. Entonces, no sólo se deben hacer evaluaciones de las capacidades individuales (autoevaluación y evaluación de desempeño), sino también de la capacidad de los servicios de inspección en su integridad.

- *Evidencia: Procedimientos oficiales y herramientas para la evaluación, informes anuales (de seguimiento)*

# Criterio 12: Poniendo los pies sobre la tierra

*Las instituciones a cargo de las inspecciones y de hacer cumplir la normatividad y el sistema de promoción del cumplimiento en general, deben alcanzar los niveles de desempeño que se espera de ellos – en términos de satisfacción de los interesados, eficiencia (beneficios/costos) y eficacia total (seguridad, salud, protección ambiental, etc.).*

**Preguntas clave:**

- ¿El desempeño de las entidades a cargo de las inspecciones y de la promoción del cumplimiento (en términos de satisfacción, eficiencia y efectividad), es medido regularmente?
- ¿El nivel de satisfacción y confianza de los grupos de interés (empresas y sociedad civil) es estable o está mejorando?
- ¿El desempeño en términos de salvaguardar el bienestar social y/o controlar riesgos es estable o está mejorando (corrección de posibles efectos externos)?
- ¿La eficiencia (desempeño en términos de bienestar social equilibrado en costos para el Estado y cargas para los administrados) es estable o está mejorando?

***Subcriterio 12.1.* El desempeño de las entidades a cargo de las inspecciones y promoción del cumplimiento (en términos de satisfacción, eficiencia y efectividad) es medido regularmente**

A través del uso de una variedad de medios (encuestas, estadísticas oficiales, observaciones directas, evaluaciones de expertos, consultas, etc.), debe hacerse un seguimiento regular de los indicadores clave de desempeño: satisfacción y confianza (entre los sujetos regulados, ciudadanos, consumidores, etc.), eficiencia (costos en términos presupuestarios, cargas a los sujetos regulados) y efectividad (salud, seguridad, protección ambiental, etc.). Si bien la recolección de datos implica retos y costos significativos, el seguimiento del desempeño es indispensable para el buen funcionamiento y mejoramiento del sistema. Esta información debe servir de base para las evaluaciones regulares, revisiones, cambios y reformas, de ser necesario.

- *Evidencia: Disponibilidad de datos (con regularidad y calidad adecuadas)*

***Subcriterio 12.2.* El nivel de satisfacción y confianza de los grupos de interés (empresas y sociedad civil) es estable o está mejorando**

Medido a través de encuestas focalizadas y/o herramientas cualitativas (por ejemplo, grupos focales), consultas en línea, etc. La satisfacción y la confianza de los sujetos regulados (en relación con el profesionalismo, recomendaciones, etc.) y de aquellos que esperan protección de la regulación (ciudadanos, consumidores, trabajadores, etc.) debe ser un balance en términos de efectividad. Obviamente, el nivel de la satisfacción de los grupos de interés no debe ser el único indicador de éxito (ver subcriterios siguientes) debido a que la falta de información de los interesados o sus prejuicios pueden jugar un rol al expresar su satisfacción. Aun así, sigue siendo un importante indicador.

- *Evidencia: Datos de las encuestas a empresas, grupos focales, etc. con tendencias positivas*

***Subcriterio 12.3.* El desempeño en términos de salvaguardar el bienestar social y/o controlar riesgos es estable o está mejorando (corrección de posibles efectos externos)**

Las inspecciones y las actividades de promoción del cumplimiento sólo tienen una influencia indirecta y limitada sobre las metas trazadas (salud, seguridad, etc.), de manera que se debe evaluar su desempeño en términos de tendencias (ya sea que mejoren o no) y corrigiendo por efectos externos. También es crucial corregir la calidad de los datos, lo que en ciertos casos puede resultar problemático, mediante el uso de diversas fuentes, estudios, monitoreo, etc., así como estudios ad hoc cuando los existentes no sean suficientes

- *Evidencia: Datos de fuentes oficiales, completadas, en lo posible, con estudios o monitoreo independientes (incluyendo encuestas), que muestran tendencias positivas*

***Subcriterio 12.4.* La eficiencia (desempeño en términos de bienestar social, equilibrado con los costos para el Estado y cargas para los administrados) es estable o está mejorando**

Las tareas de inspección y promoción del cumplimiento generan costos para el Estado y cargas para los sujetos regulados, los cuales deben ser analizados periódicamente (incluyendo la realización de encuestas a los sujetos regulados) a fin de establecer un balance frente al desempeño en términos de efectividad.

- *Evidencia: Datos de fuentes oficiales (costos presupuestales, informes anuales), completados, en lo posible, con encuestas u otros mecanismos de medición (por ejemplo, estudios del Modelo de Costeo Estándar), con tendencias positivas*

# *Referencias*

OECD (2014), *Regulatory Enforcement and Inspections*, OECD Best Practice Principles for Regulatory Policy, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/9789264208117-en. [1]

OECD (2012), *Recommendation of the Council on Regulatory Policy and Governance*, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/9789264209022-en. [2]

OECD (2010), *Better Regulation in Europe: Netherlands 2010*, Better Regulation in Europe, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/9789264084568-en. [3]

# LA ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICOS (OCDE)

La OCDE constituye un foro único en su género, donde los gobiernos trabajan conjuntamente para afrontar los retos económicos, sociales y medioambientales que plantea la globalización. La OCDE está a la vanguardia de los esfuerzos emprendidos para ayudar a los gobiernos a entender y responder a los cambios y preocupaciones del mundo actual, como el gobierno corporativo, la economía de la información y los retos que genera el envejecimiento de la población. La Organización ofrece a los gobiernos un marco en el que pueden comparar sus experiencias políticas, buscar respuestas a problemas comunes, identificar buenas prácticas y trabajar en la coordinación de políticas nacionales e internacionales.

Los países miembros de la OCDE son: Alemania, Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Chile, Corea, Dinamarca, Eslovenia, España, Estados Unidos de América, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Israel, Italia, Japón, Letonia, Lituania, Luxemburgo, México, Noruega, Nueva Zelanda, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, República Eslovaca, Suecia, Suiza y Turquía. La Comisión Europea participa en el trabajo de la OCDE.

Las publicaciones de la OCDE aseguran una amplia difusión de los trabajos de la Organización. Éstos incluyen los resultados de la compilación de estadísticas, los trabajos de investigación sobre temas económicos, sociales y medioambientales, así como las convenciones, directrices y los modelos desarrollados por los países miembros.

ÉDITIONS OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARÍS CEDEX 16
ISBN 978-92-64-98938-2 – 2019

# Guía de la OCDE para el cumplimiento regulatorio y las inspecciones

La manera en que las regualciones son implementadas y cómo se asegura y promueve su cumplimiento, son determinantes para evaluar si un sistema regulatorio funciona como lo planeado. Las inspecciones son uno de los medios más importantes para hacer cumplir las regualaciones y asegurar que se cumpla con sus disposiciones. Preparada con base en los Principios de la OCDE sobre las Mejores Prácticas para Hacer Cumplir las Normas y para Realizar Inspecciones (2014), esta Guía ofrece a los funcionarios gubernamentales, reguladores, grupos de interés y a los expertos, una herramienta sencilla para la evaluación de los sistemas establecidos para efectuar inspecciones y para hacer cumplir las regulaciones en cada jurisdicción, institución o estructura. Su lista de verificación de 12 criterios puede ser empleada para identificar fortalezas y debilidades, medir el desempeño real del sistema evaluado y determinar áreas a mejorar.

Consulte esta publicación en línea: ***https://doi.org/10.1787/0fe43505-es***.

Este trabajo está publicado en OECD iLibrary, plataforma que reúne todos los libros, publicaciones periódicas y bases de datos de la OCDE.
Visite ***www.oecd-ilibrary.org*** para más información.

ISBN 978-92-64-98938-2

OECD publishing
www.oecd.org/publishing

# MODELO NACIONAL DE AMENAZA SÍSMICA PARA COLOMBIA

**Bogotá, diciembre de 2018**

**SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO ©**

Oscar Paredes Zapata

**Director General**

Marta Lucia Calvache Velasco

**Directora Técnica de Geoamenazas**

Viviana Dionicio Lozano

**Coordinador Grupo de Monitoreo y Evaluación de Actividad Sísmica**

María Mónica Arcila

**Líder Técnico – Grupo de amenaza sísmica**

**AUTORES**

**Servicio Geológico Colombiano**
Maria Mónica Arcila
Julián Santiago Montejo Espitia
Jaime Fernando Eraso
Jairo Andrés Valcárcel Torres
Miguel Genaro Mora Cuevas
Fernando Javier Díaz Parra

**Fundación Global Earthquake Model**
Julio García
Marco Pagani
Daniele Viganò

**Citación:**

(SGC & GEM, 2018). "Modelo Nacional de Amenaza sísmica de Colombia. Servicio Geológico Colombiano (SGC) – Grupo de Amenaza Sísmica. Fundación Global Earthquake Model (GEM). 196 pp.

# PRESENTACIÓN

Colombia ocupa un territorio en el que las fuerzas de la naturaleza y su expresión geológica producen eventos que pueden ser peligrosos para la población. Este ambiente es un reto que demanda al país (y a nosotros como ciudadanos), los mejores esfuerzos para entender la dinámica de la tierra de tal forma que podamos diseñar nuestras ciudades e infraestructura de la menor manera posible con el conocimiento disponible.

En este camino de aprendizaje, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha sido encargado, a través del decreto 2703 de 2013, de una importante misión respecto al conocimiento e investigación de amenazas de origen geológico y del riesgo físico asociado. Esto significa que no sólo debemos preocuparnos por los eventos detonantes (los sismos, los volcanes), sino también por las potenciales consecuencias y daños esperados.

En particular, el SGC es responsable de la producción de lineamientos para evaluar tales amenazas, así como del apoyo a entes territoriales e instituciones del Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres y del Sistema Nacional Ambiental, respecto al análisis de la amenaza y riesgo físico y de su incorporación en la planificación y ordenamiento territorial.

En el cumplimiento de estas responsabilidades, el SGC desde hace varios años ha venido trabajando con compromiso y rigor en el conocimiento y modelación de la amenaza sísmica. Esto ha implicado la revisión y discusión del catálogo de eventos sísmicos; la delimitación juiciosa de las zonas que producen terremotos, así como la evaluación y selección de las ecuaciones que relacionan la magnitud de los sismos con las intensidades (aceleraciones, velocidades) que pueden llegar a presentarse en cualquier punto del territorio.

El reto del conocimiento de la amenaza y del riesgo sísmico lo asumimos con legitimidad y observancia científica. Somos conscientes que el conocimiento no nace de una sola organización y que debe construirse con el aporte de una comunidad técnica. A su vez, la curiosidad propia de los investigadores y el deseo de un mejor conocimiento, han permitido que el SGC explore metodologías novedosas y establezca alianzas con expertos nacionales e internacionales para el desarrollo de un modelo de amenaza sísmica nacional. Bajo estos preceptos queremos proveer a los tomadores de decisiones con la mejor información existente sobre la amenaza y riesgo sísmico.

Cada estructura que edificamos, nuestras viviendas, los edificios en donde trabajamos, los puentes que transitamos, la infraestructura de servicios públicos, etc., en algún momento de la historia podrán ser puestos a prueba por la visita inesperada de un sismo,

y de su resultado dependerá la seguridad de la vida de todos, por lo tanto, como comunidad debemos tejer el conocimiento sobre el riesgo sísmico con un hilo que conecte a los sismos con nuestra ocupación del territorio, el diseño de estructuras y la seguridad de la población.

Finalmente los invito a usar con sentido crítico los resultados de este estudio. Las observaciones y los aportes para mejorar este modelo son bienvenidos, al igual que la discusión de la información aquí consignada.

**Oscar Paredes Zapata**

Director General Servicio Geológico Colombiano

# CONTENIDO

**Pág.**

PRESENTACIÓN ..... i

LISTA DE ANEXOS ..... 15

RESUMEN ..... 17

ABSTRACT ..... 18

1. INTRODUCCIÓN ..... 19

1.1 Principales sismos ocurridos en el país ..... 20
1.2 Estudios previos de amenaza sísmica ..... 24
1.3 Estructura del informe y del modelo de amenaza sísmica ..... 31

2. OBJETIVOS Y ALCANCE ..... 33

2.1 Objetivos ..... 33
2.2 Alcances y limitaciones ..... 34

3. CONJUNTO DE DATOS BÁSICOS ..... 37

3.1 Catálogo Sísmico Integrado ..... 38
3.1.1 Catálogos sísmicos utilizados ..... 38
3.1.2 Integración de los catálogos seleccionados ..... 45
3.1.3 Homogeneización de magnitudes ..... 53
3.1.4 Catálogo Sísmico Integrado ..... 58
3.1.5 Remoción de eventos dependientes del Catálogo Sísmico Integrado ..... 59
3.1.6 Análisis de completitud ..... 62
3.2 Base de datos de fallas activas ..... 64
3.3 Base de datos de movimientos fuertes ..... 69
3.3.1 Información por región tectónica ..... 69
3.3.2 Base de datos de Estaciones ..... 73
3.3.3 Procesamiento de acelerogramas ..... 76

4. MODELO DE FUENTES SÍSMICAS ..... 79

4.1 Clasificación tectónica de la sismicidad ..... 81

4.1.1 Cortical ..... 84
4.1.2 Zona de subducción del pacífico (interplaca) ..... 85
4.1.3 Zona de Benioff ..... 85
4.1.4 Sismicidad intraplaca del nido sísmico de Bucaramanga ..... 87
4.1.5 Criterios para la clasificación de sismos según ambientes tectónicos ..... 88
4.2 Árbol lógico de fuentes sísmicas adoptado para Colombia ..... 91
4.3 Modelación de fuentes sísmicas ..... 93
4.3.1 Fuentes superficiales tipo área (volumétricas) ..... 93
4.3.2 Modelo de sismicidad suavizada y de fuentes tipo falla ..... 104
4.3.3 Modelación de fuentes de subducción y profundas ..... 117

5. SELECCIÓN DE ECUACIONES DE ATENUACIÓN ..... 132

5.1 Pre selección de ecuaciones de atenuación ..... 133
5.2 Evaluación de ecuaciones de atenuación ..... 137
5.2.1 Análisis de residuales ..... 138
5.2.2 Modelo de verosimilitud ..... 138
5.2.3 Modelo del logaritmo de verosimilitud normalizado ..... 139
5.2.4 Ranking basado en la Distancia Euclidiana (EDR) ..... 140
5.2.5 Definición de árboles lógicos de ecuaciones de atenuación ..... 142

6. CÁLCULO DE LA AMENAZA SÍSMICA ..... 154

6.1 Metodología para la estimación de la amenaza sísmica ..... 155
6.1.1 Componentes del modelo de amenaza ..... 155
6.1.2 Fuentes de incertidumbre en la evaluación de la amenaza sísmica ..... 156
6.1.3 Evaluación de curvas de amenaza ..... 157
6.1.4 Estimación de espectros de amenaza uniforme y mapas de amenaza ..... 160
6.2 Requerimientos computacionales ..... 161

7. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE AMENAZA SÍSMICA ..... 162

7.1 Mapas de amenaza en roca firme ..... 162
7.1.1 Relaciones entre las aceleraciones pico obtenidas para diferentes periodos de retorno ..... 167
7.1.2 Ambientes tectónicos predominantes en la evaluación de la amenaza sísmica ..... 168
7.2 Curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme ..... 170
7.3 Desagregación de la amenaza sísmica ..... 170

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 174

8.1 Conjunto de datos básicos ..... 175

8.2 Modelo de fuentes sísmicas ..... 177
8.3 Ecuaciones de atenuación ..... 179
8.4 Resultados ..... 180
8.5 Recomendaciones ..... 181

9. REFERENCIAS ..... 182

# LISTA DE FIGURAS

**Pág.**

Figura 1. Mapa de intensidades máximas observadas para Colombia ..... 23

Figura 2. (a) Mapa de intensidades macrosísmicas esperadas; (b) aceleración pico. Ventana de observación de 100 años..... 24

Figura 3. Valores de aceleración horizontal máxima esperada. ..... 26

Figura 4. Mapa del valor promedio de aceleraciones pico efectivas. ..... 27

Figura 5. Mapa nacional de amenaza sísmica. Periodo de retorno 475 años ..... 28

Figura 6. Aceleración pico para periodo de retorno de 475 años ..... 30

Figura 7. Esquema metodológico del modelo de amenaza sísmica ..... 32

Figura 8. Errores en latitud y longitud de los eventos reportados en el catálogo del SGC ..... 43

Figura 9. Errores en Profundidad (izquierda) y GAP (derecha) de los eventos reportados en el catálogo del SGC. ..... 43

Figura 10. Zona de confiabilidad del catálogo del SGC correspondiente al promedio de los límites de los errores en latitud, longitud, profundidad y GAP ..... 44

Figura 11. Participación por agencia en términos de magnitud y localización de los eventos..... 49

Figura 12. Soluciones preferidas de los catálogos consultados ..... 50

Figura 13. Soluciones preferidas de los catálogos regionales consultados. ..... 52

Figura 14. Soluciones preferidas del catálogo del Servicio Geológico Colombiano ..... 53

Figura 15. Relación entre magnitudes Mw (GCMT) y mb (NEIC –GCMT) para 378 49 eventos..... 55

Figura 16. Relación entre magnitudes Mw (GCMT) y Ms (NEIC –GCMT) para 21070 eventos ..... 56

Figura 17. Relación entre mb (ISC) y Ml (SGC) para 1599 eventos..... 57

Figura 18. Mapa de distribución de epicentros contenidos en el Catálogo Sísmico Integrado comprendido entre los años 1610 a 2014 ..... 59

Figura 19. Ventanas espacio-temporales implementadas en la herramienta HMTK para remover eventos dependientes siguiendo el método propuesto por Gardner y Knopoff (1974) ..... 60

Figura 20. Eventos principales resultado de la remoción de eventos dependientes..... 61

Figura 21. Variación en el tiempo (años) de la magnitud de completitud (Mc) y su desviación estándar ($\boldsymbol{\sigma}\ \lambda$) usando el método de Stepp ..... 63

Figura 22. Base de datos de fallas activas del proyecto SARA (v.1.0) ..... 65

Figura 23. Mapas de fallas cuaternarias ..... 66

Figura 24. Base de datos de fallas activas utilizadas en el modelo. ..... 67

Figura 25. (a) Distribución de los registros de la base de datos de movimiento fuerte; (b) distribución de las profundidades de los eventos ..... 70

Figura 26. Distribución de magnitudes (Mw) para los eventos seleccionados ..... 71

Figura 27. Distribución de mecanismos focales por región tectónica ..... 72

Figura 28. Vs30 [m/s] inferido para las estaciones de registro ..... 74

Figura 29. a.) Z1 y b.) Z2.5 [m] inferido para las estaciones de registro ..... 75

Figura 30. Distribución de las estaciones de registro alrededor del arco volcánico ..... 75

Figura 31. Esquema de procesamiento de acelerogramas ..... 77

Figura 32. Fuentes sismogénicas propuestas por AIS (2009) ..... 80

Figura 33. Esquema general de actividades del modelo de fuentes sísmicas ..... 81

Figura 34. Tectónica regional ..... 82

Figura 35. Configuración neotectónica de la región Caribe y el Norte de Los Andes ..... 83

Figura 36. Mapa del límite de la transición corteza-manto (“moho”) en la región de estudio ..... 84

Figura 37. Esquema de proceso de subducción ..... 85

Figura 38. Secciones transversales perpendiculares a la trinchera del Pacífico ..... 86

Figura 39. Secciones transversales en la localización del nido sísmico de Bucaramanga ..... 87

Figura 40. Ambientes tectónicos definidos en el modelo ..... 89

Figura 41. Clasificación sismotectónica de los eventos del catálogo (sin eventos dependientes) ..... 90

Figura 42. Estructura del modelo según profundidad y tipo de fuentes sísmicas ..... 91

Figura 43. Árbol lógico del modelo de fuentes sísmicas adoptado ..... 92

Figura 44. Esquema del procedimiento para la definición de la geometría de fuentes sísmicas superficiales ..... 94

Figura 45. Modelo de fuentes corticales (tipo área) propuesto por el SGC-IGME ..... 95

Figura 46. Ejemplo de distribución Gutenberg Richter doblemente truncada ..... 98

Figura 47. Ejemplo de fuentes tipo área ..... 100

Figura 48. Ejemplo de histogramas de eventos en profundidad ..... 100

Figura 49. Ejemplos de análisis de mecanismos focales y orientación preferencial y cinemática ..... 101

Figura 50. Parámetro a Fuentes corticales tipo área ..... 102

Figura 51. Parámetro b Fuentes corticales tipo área ..... 103

Figura 52. Magnitud máxima. Fuentes corticales (tipo área) ..... 104

Figura 53. Modelo de fuentes corticales considerando fuentes tipo falla y modelos de sismicidad distribuida ..... 105

Figura 54. Parámetros de sismicidad de macro-zonas consideradas para el modelo de sismicidad suavizada ..... 106

Figura 55. Ejemplo de fuentes puntuales (a) diferencias según relaciones de escala y de aspecto; (b) diferencias según buzamiento, (c) rumbo] y (d) profundidades hipocentrales ..... 108

Figura 56. Ejemplo de fuente tipo falla con rupturas flotantes ..... 109

Figura 57. Distribución de recurrencia de magnitudes para fallas activas de la macro-zona C02 ..... 111

Figura 58. Distribución de recurrencia de magnitudes de fallas activas de la macro zona C03 ..... 111

Figura 59. Parámetros para la caracterización de fallas activas ..... 116

Figura 60. Mapas con las secciones creadas para para definir la geometría de: a) subducción Nazca/Suramérica y sismicidad profunda (Bucaramanga). ..... 118

Figura 61. Ejemplo de secciones creadas para para definir la geometría del proceso de subducción entre las placas Nazca y Suramérica ..... 119

Figura 62. Ejemplo de secciones creadas para para definir la geometría de la sismicidad del Nido de Bucaramanga ..... 120

Figura 63. Tope del volumen de subducción entre las placas Nazca y Suramérica en la región colombo-ecuatoriana ..... 121

Figura 64. Tope del volumen subducido para la región del nido sísmico de Bucaramanga (sismicidad profunda) ..... 121

Figura 65. Dimensiones de fuentes interplaca; profundidad de los límites: mínimo y máximo ..... 122

Figura 66. Segmentación de la zona de subducción de Colombia ..... 124

Figura 67. Parámetros de sismicidad de fuentes interplaca del proceso de subducción del pacífico ..... 125
Figura 68. Parámetros de sismicidad de fuentes de la zona Benioff ..... 127
Figura 69. Parámetros de sismicidad de fuentes del nido de Bucaramanga ..... 127
Figura 70. Ejemplo de una falla compleja ..... 128
Figura 71. Profundidad de la superficie de fuentes interplaca. Modelo no segmentado ..... 129
Figura 72. Vista en planta de la malla que representa la placa en la zona de Benioff correspondiente a una magnitud de 6.05 Mw ..... 130
Figura 73. Malla de puntos de la placa en la zona de Benioff correspondiente a una magnitud de 6.05 Mw ..... 130
Figura 74. Procedimiento empleado para la selección de ecuaciones de atenuación . 133
Figura 75. Tipos de medidas de la distancia entre sitios de análisis y rupturas ..... 137
Figura 76. Datos de movimiento fuerte para la zona de Benioff. ..... 144
Figura 77. Resultados estadísticos para la zona de Benioff. ..... 145
Figura 78. Datos de movimiento fuerte para el Nido de Bucaramanga. ..... 147
Figura 79. Resultados estadísticos para el Nido de Bucaramanga. ..... 148
Figura 80. Datos de movimiento fuerte para la zona de Interplaca ..... 149
Figura 81. Resultados estadísticos para la zona de Interplaca ..... 150
Figura 82. Datos de movimiento fuerte para eventos corticales ..... 151
Figura 83. Resultados estadísticos para eventos corticales. ..... 152
Figura 84. Realizaciones para la estimación de la amenaza sísmica ..... 158
Figura 85. Componentes del cálculo del modelo de amenaza sísmica ..... 160
Figura 86. Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 475 años ..... 163
Figura 87. Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 975 años ..... 164
Figura 88. Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 2475 años ..... 165
Figura 89. Cociente entre aceleraciones pico para diferentes periodos de retorno .... 167
Figura 90. Ambiente tectónico de mayor aceleración pico (Tr 475 años) ..... 168
Figura 91. Ambiente tectónico de segunda mayor aceleración pico (Tr 475 años) ..... 169
Figura 92. (a) curva de amenaza; (b) espectro de amenaza uniforme (Tr 475 años) para un punto dentro del municipio de Pasto ..... 170

Figura 93. Desagregación de la amenaza sísmica para Pasto según (a) distancia; (b) magnitud de las rupturas (TR 475- PGA) ..... 171

Figura 94. Resultados de la desagregación de la amenaza sísmica para Popayán según ambientes tectónicos y periodos de vibración para (a) Tr =475 años; (b) 975 años .... 171

Figura 95. Distribución geográfica de la contribución de las rupturas a la amenaza sísmica de Popayán según ambientes tectónicos. Periodo de retorno 475 años..... 172

# LISTA DE TABLAS

**Pág.**

Tabla 1. Resumen de daños observados en principales eventos históricos ..... 20

Tabla 2 Características generales de la información usada de los catálogos globales y locales en la construcción del catálogo integrado ..... 39

Tabla 3. Criterios de priorización para la localización de los sismos ..... 46

Tabla 4. Criterios de priorización para la magnitud de los sismos ..... 46

Tabla 5. Criterios de priorización según el tipo de magnitud ..... 47

Tabla 6 Matriz de prioridad para localización para cada uno de los catálogos seleccionados ..... 47

Tabla 7. Matriz de priorización por magnitud para cada uno de los catálogos seleccionados ..... 48

Tabla 8. Números de eventos aportados por agencia luego de la priorización ..... 48

Tabla 9. Relaciones obtenidas entre magnitud Mw (GCMT) y mb (NEIC –GCMT) ..... 55

Tabla 10. Relaciones obtenidas entre magnitudes Mw (GCMT) y ms (NEIC –GCMT) ..... 56

Tabla 11. Relaciones entre magnitudes Mb (ISC) y MI (SGC) ..... 57

Tabla 12. Características generales del Catálogo Final Integrado ..... 58

Tabla 13. Clasificación sismo-tectónica de la sismicidad para eventos del catálogo (sin eventos dependientes), según modelos de fuentes ..... 62

Tabla 14. Rangos de completitud para el Catálogo Integrado del SGC ..... 64

Tabla 15. Estructura de la base de datos paramétrica de las fallas activas ..... 68

Tabla 16. Registros acelerográficos por ambiente tectónico ..... 69

Tabla 17. Número y tipo de mecanismos focales por región tectónica ..... 73

Tabla 18. Número de eventos por rango de Vs30 y fuente sísmica ..... 76

Tabla 19. Clasificación sismo-tectónica de la sismicidad para eventos del catálogo (sin eventos dependientes), según modelos de fuentes ..... 90

Tabla 20. Ejemplo descripción de una zona sismogénica ..... 96

Tabla 21. Principales parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas pertenecientes al modelo zonificado de fuentes corticales ..... 98

Tabla 22. Parámetros principales de las macro zonas consideradas para el modelo de sismicidad distribuida (tipo kernel) ..... 107

Tabla 23. Parámetros principales de las fuentes sísmicas tipo: fallas simples, pertenecientes al modelo cortical ..... 112

Tabla 24. Características de los segmentos de la zona de subducción ..... 124

Tabla 25. Ecuaciones pre seleccionadas para eventos corticales ..... 134

Tabla 26. Ecuaciones pre seleccionadas para eventos de Interplaca..... 136

Tabla 27. Ecuaciones pre seleccionadas para eventos de Intraplaca. ..... 136

Tabla 28. Parámetros de evaluación ..... 143

Tabla 29. Pesos definitivos para el árbol lógico de ecuaciones de atenuación para la zona de Benioff. ..... 146

Tabla 30. Pesos definitivos para el árbol lógico de ecuaciones de atenuación para el Nido de Bucaramanga. ..... 147

Tabla 31. Pesos definitivos para árbol lógico de ecuaciones de atenuación para la zona de Interplaca. ..... 151

Tabla 32. Pesos definitivos para el árbol lógico de ecuaciones de atenuación para eventos corticales. ..... 153

Tabla 33. Modelo de fuentes sísmicas..... 156

Tabla 34. Árbol lógico de ecuaciones de atenuación para cada ambiente tectónico ... 156

Tabla 35. Aceleración pico en roca estimada para capitales departamentales y para diferentes periodos de retorno ..... 166

Tabla 36 Descripción general de los eventos de la base de datos de movimiento fuerte ..... 176

Tabla 37. Resumen del árbol lógico de fuentes sísmicas ..... 179

Tabla 38. Resumen del árbol lógico de ecuaciones de atenuación..... 180

# LISTA DE ANEXOS

A Base de datos de movimiento fuerte

B Metodología adoptada para la corrección de línea base y filtrado de acelerogramas

C Distribuciones de magnitud-frecuencia para fuentes corticales tipo área

D Distribuciones de magnitud-frecuencia para macro zonas del modelo de sismicidad suavizado

E Distribuciones de magnitud-frecuencia para fallas activas

F Distribuciones de magnitud-frecuencia para fuentes interplaca (subducción), Benioff y nido sísmico de Bucaramanga

G Propiedades geométricas utilizadas para el uso de ecuaciones de atenuación

H Resultados de la selección de ecuaciones de atenuación según ambiente tectónico

I Espectros de amenaza uniforme y curvas de amenaza para capitales departamentales

J Descripción del sistema de consulta del modelo y de los resultados de la amenaza sísmica

# RESUMEN

En Colombia, durante los últimos 50 años el estudio de la amenaza sísmica ha sido promovido por diversas instituciones. Como resultado de estos esfuerzos, varios modelos a escala nacional y regional han sido desarrollados. Entre los principales logros se encuentran mapas de amenaza para el país, así como curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme para ciudades capitales. Tales resultados han sido relevantes para la definición de los coeficientes sísmicos para el diseño sismo resistente, así como para el cálculo del riesgo sísmico.

Frente al conocimiento de la amenaza sísmica, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) tiene entre sus responsabilidades la investigación y evaluación de amenazas de origen geológico que pueden afectar a municipios y departamentos del país. Así, en el cumplimiento de sus funciones, el SGC ha trabajado continuamente en el estudio de la amenaza sísmica de Colombia.

En este sentido, el presente informe describe un modelo de amenaza sísmica a escala nacional, el cual fue elaborado en conjunto entre el SGC y la Fundación Global Earthquake Model (GEM). Este modelo abarca los siguientes componentes:

(i) *Construcción y depuración de un catálogo homogéneo de eventos:* considerando datos actualizados de la red sismológica nacional, información de sismos históricos, así como catálogos internacionales.

(ii) *Definición de fuentes sísmicas*: en un modelo de amenaza, las fuentes sísmicas permiten identificar la distribución geográfica y recurrencia de sismos de diferentes magnitudes. Para definir estas fuentes, la sismicidad del país se clasificó en los siguientes ambientes tectónicos: superficial, sismos interplaca del proceso de subducción del pacífico, sismos intraplaca de la zona de Benioff y sismos intermedios del nido sísmico de Bucaramanga. Para cada ambiente tectónico se definieron diferentes alternativas para la modelación de las fuentes sísmicas.

Para la zona superficial se consideraron modelos de sismicidad equiprobable, así como modelos de sismicidad distribuida y de fallas activas. A su vez, para la zona de Benioff y para los sismos de interplaca se consideraron diferentes alternativas según la profundidad y geometría de las fuentes. Para cada caso de análisis se definió la geometría (límites geográficos) y los parámetros de sismicidad de las fuentes considerando el catálogo depurado de eventos, así como información y modelos geológicos disponibles. Como resultado, en este componente se establece un árbol lógico de fuentes sísmicas.

(iii) *Selección de ecuaciones de atenuación*: Para cada ambiente tectónico se preseleccionó un conjunto de ecuaciones de atenuación con el fin de estimar las intensidades del movimiento esperadas ante la ocurrencia de sismos. Para las ecuaciones preseleccionadas se evaluaron diferentes criterios para determinar su ajuste con las aceleraciones espectrales observadas en los registros de la red nacional de acelerógrafos. Como resultado, en este componente se establece un árbol lógico de ecuaciones de atenuación.

(iv) *Evaluación de la amenaza sísmica*: para este fin se adopta un enfoque probabilista a partir del cual es posible obtener espectros de amenaza uniforme para diferentes períodos de retorno y curvas de amenaza para las ciudades capitales, municipios y centros poblados del país. Asimismo, se elaboraron mapas de aceleraciones espectrales para diferentes períodos de vibración y períodos de retorno. Los resultados de este análisis y la descripción de las fuentes sismogénicas se encuentran disponibles en el siguiente enlace:
https://amenazasismica.sgc.gov.co**.**

# ABSTRACT

Within the last 50 years, different institutions have promoted the study of the seismic hazard of Colombia. As a result, various national and regional models have been developed. Among the main achievements, seismic hazard maps for the country, as well as seismic hazard curves and uniform hazard spectra for main cities have been obtained. Such results have been relevant for the definition of seismic actions for earthquake design codes; also such models has been considered for earthquake risk estimates.

Regarding the evaluation of the seismic hazard, The Colombian Geological Survey (SGC) is in charge of the research of geological hazards that may affect municipalities and departments of the country. In this regard, the SGC has dedicated efforts in the development of a seismic hazard model for Colombia.

The current report describes a national seismic hazard model, developed between the SGC and the Global Earthquake Model Foundation (GEM). Such model encompasses the following aspects:

*(i) Development of a homogeneous earthquake catalogue:* by considering updated data from the national seismological network, information of historic and observed (recent) earthquakes, as well as international earthquake catalogues.

*(ii) Definition of seismic sources:* in a hazard model, the seismic sources allows identifying the geographical distribution and recurrence of earthquakes of different magnitudes. In order to define such sources, the seismicity of the country was classified into the following tectonic environments: superficial, interplate events from the pacific subduction process, intraplate events in the Benioff zone and deep events of the Bucaramanga seismic nest. For each tectonic environment, different alternatives for seismic sources modelling were considered.
For modelling superficial sources, zones of equally distributed seismicity were considered, as well as smoothed seismicity models and active faults. Besides, for Benioff regions and interplate events, different alternatives regarding the depth and geometry of sources were considered. For each case, the geometry (geographic limits) and their seismicity parameters were estimated taking into account the homogeneous earthquake catalogue and available geological models. As a result, a seismic sources logic tree was established.

*(iii) Selection of Ground Motion Prediction Equations (GMPEs):* in order to estimate ground motion intensities for a given earthquake, for each tectonic environment a set of GMPEs were pre-selected. For each pre-selected GMPE, different criteria were evaluated in order to identify their similarity (adjustment) with observed spectral accelerations (according to national network of accelerometric registers). As a result, a GMPEs logic tree was determined.

*(iv) Seismic hazard assessment:* By following a probabilistic seismic hazard assessment, for each municipality and urban center of Colombia, uniform hazard spectra (for different return periods) as well as hazard curves were obtained. In addition, spectral accelerations maps, for different return periods and different vibration periods were calculated. Such results, as well as a description of seismic sources are available in the following link:
https://amenazasismica.sgc.gov.co.

# 1. INTRODUCCIÓN

De manera general, la amenaza sísmica representa la severidad y la frecuencia de los sismos que pueden ocurrir en un determinado sitio. En el caso de Colombia, la amenaza sísmica está asociada a la convergencia de las placas litosfericas de Nazca, Sur América y Caribe, cuya compleja dinámica da origen a sismos de diferentes características a lo largo del territorio nacional, los cuales pueden tener un alto potencial destructivo.

Como respuesta a la ocurrencia de sismos y de sus efectos devastadores, en los últimos 50 años se han llevado a cabo esfuerzos con el fin de construir catálogos de sismos, identificar fuentes sísmicas, desarrollar redes de monitoreo sísmico y elaborar modelos de amenaza.

Entre los eventos más recientes y de mayores efectos se encuentran los sismos de Popayán de 1983 (magnitud 5.3 Mw) y el sismo del eje cafetero del 25 de enero de 1999 (magnitud 6.1 Mw), los cuales fueron parte de la causa de una amplia destrucción de edificios e infraestructura, cuyos impactos sociales y económicos fueron importantes para el país. Tales eventos señalaron la importancia de un trabajo continuo tanto en el conocimiento de la amenaza sísmica como en las medidas de protección ante estos eventos.

Frente al conocimiento de la amenaza sísmica, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) como Instituto Científico y Técnico del Gobierno Nacional, tiene a su cargo la investigación de los procesos geológicos generadores de amenazas y la evaluación de las amenazas que estos representan a escalas nacional y regional, entre ellos la amenaza sísmica. Asimismo, se encarga de proponer, evaluar y difundir metodologías de evaluación de amenazas con afectaciones departamentales y municipales. Igualmente, busca proveer información sobre las amenazas y riesgo físico de origen geológico a las instancias y autoridades competentes y a la comunidad, con fines de planificación, ordenamiento territorial y gestión del riesgo.

En el marco de sus funciones, el SGC en conjunto con la Fundación Global Earthquake Model, elaboró un modelo nacional de amenaza sísmica. Mediante este modelo se busca la zonificación y análisis de recurrencia de sismos de diferentes características (p.e. magnitudes), así como la estimación de las intensidades del movimiento que pueden producir tales eventos en el territorio (p.e. aceleraciones). A partir de esta información y bajo una metodología probabilista, la amenaza sísmica de un sitio específico se mide en términos de la probabilidad de excedencia de una determinada intensidad del movimiento, considerando un período de observación dado.

En este capítulo se presenta una descripción de los principales sismos ocurridos en el país, de tal manera que se pueda tener una aproximación a la distribución geográfica de la amenaza. A su vez, se presentan principales experiencias en la modelación de la

amenaza sísmica, con el fin de identificar los logros alcanzados en estudios previos, así como los aportes de este estudio.

## 1.1 Principales sismos ocurridos en el país

La Tabla 1 presenta descripciones de algunos de los daños observados en los principales sismos ocurridos en Colombia. Tales sismos se seleccionaron según el número de reportes del evento, así como por sus magnitudes e intensidades macrosísmicas estimadas. La descripción de daños se realizó a partir de los datos disponibles en el Sistema de Información de Sismicidad Histórica de Colombia del SGC (SGC, s/f).

**Tabla 1. Resumen de daños observados en principales eventos históricos**

| Fecha | Magnitud (Mw) | Sitio relacionado | Descripción de daños |
|---|---|---|---|
| 1644/01/16 | 6.5 | Pamplona (Norte de Santander) | Destrucción generalizada en Pamplona (Norte de Santander) y San Cristóbal (Venezuela). Colapsos en iglesias de estas ciudades. |
| 1827/11/16 | 7.1 | Altamira (Huila) | Se considera como uno de los eventos más destructivos del país, cuyos efectos más severos se observaron en el departamento del Huila. Se presentaron colapsos de la mayoría de las viviendas en los municipios de Timaná, Tarquí y Garzón. En otros municipios como Gigante, Guadalupe, Palermo, Villavieja y Acevedo se presentaron daños en numerosas viviendas y en las iglesias. A su vez, este evento detonó un conjunto de deslizamientos y represamientos en diferentes cuerpos de agua que a su vez generaron flujos de lodo que afectaron a otras poblaciones. |
| 1875/05/18 | 6.8 | Cúcuta (Norte de Santander) | Destrucción casi total de los municipios de Cúcuta y Villa del Rosario (Norte de Santander), así como de poblaciones limítrofes con Venezuela. Hubo daños considerables en Pamplona, Cucutilla, Chinacota, Matanza y en otras poblaciones del estado de Táchira como San Cristóbal, Colón, Palmira y Tariba.<br>Se presentaron licuaciones de suelo en Cúcuta, Villa del Rosario, Ureña y San Antonio, en la vega de los ríos Pamplonita y Táchira. |
| 1906/01/31 | 8.8 | Costa Pacífica, Pacífico | Los daños más notables ocasionados tanto por el sismo como por el tsunami (generado por este evento), se presentaron en las costas de los departamentos de Nariño y Cauca (Colombia), y en la Provincia de Esmeraldas (Ecuador). Playas de municipios como Tumaco, Francisco Pizarro (Salahonda), Mosquera, Olaya Herrera (Bocas de Satinga), La Tola, El Charco, Santa Bárbara (Iscuandé), Guapi y Timbiquí quedaron sumergidas por las olas del tsunami, lo cual causó numerosas muertes. |
| 1917/08/31 | 6.7 | Villavicencio (Meta) | La mayoría de las construcciones de Villavicencio y del municipio de San Martín quedaron averiadas; asimismo, se presentaron algunos colapsos en San Martín y Cáqueza. En Bogotá se registraron más de 300 edificaciones averiadas y cerca de 40 destruidas. Adicionalmente, este evento detonó movimientos en masa que afectaron a diferentes poblaciones. |
| 1938/02/04 | 7.0 | Eje Cafetero | Se presentaron colapsos en los municipios de Aguadas (Caldas), Santa Rosa de Cabal (Risaralda), Salento (Quindío) y en pueblos del sur de Antioquia como Santa Bárbara, Támesis y Mesopotamia. El sismo causó |

| Fecha | Magnitud (Mw) | Sitio relacionado | Descripción de daños |
|---|---|---|---|
| | | | daños leves en municipios alejados del epicentro, tales como Quibdó, Tunja, Bogotá, Popayán, Cúcuta, Bucaramanga, entre otros. |
| 1947/07/14 | 6.0 | Pasto Nariño | En el municipio de Pasto se presentaron daños en edificios públicos y de atención a la comunidad, tales como el Hospital San Pedro (el cual tuvo que ser demolido), el palacio municipal, el palacio de la gobernación, la plaza de mercado, el matadero municipal, la Universidad de Nariño y el colegio San Francisco Javier. A su vez se presentaron daños en las torres y estructura de las iglesias de San Felipe, Pandiaco y Santiago. Por otro lado se demolieron cerca de 500 casas hechas de adobe o de ladrillo sin refuerzo que resultaron afectadas. |
| 1950/07/08 | 6.1 | Arboledas, Norte de Santander | En los municipios de Arboledas y Cucutilla la mayoría de edificaciones quedaron inservibles, muchas quedaron destruidos completamente. En los corregimientos de Villa Sucre y San José de la Montaña se presentaron múltiples colapsos, así como daños en viviendas rurales. En el municipio de Salazar todas las casas resultaron agrietadas. |
| 1962/07/30 | 6.5 | Eje Cafetero | Se presentaron colapsos de edificaciones en zonas en que la mayoría de viviendas eran construidas en tapia y bahareque: municipios del sur de Antioquia (Sonsón, Nariño y Valparaíso), en Caldas (Aguadas, Pacora, Anserma), en Risaralda (Quinchía), y en el Valle del Cauca (El Águila y Ansermanuevo). Se reportaron daños moderados en poblaciones de Tolima y Cauca. |
| 1967/02/09 | 7.0 | Colombia, Huila | Los daños más significativos ocurrieron en el departamento del Huila, en los municipios de Colombia y Campoalegre donde muchas viviendas y edificios públicos colapsaron, y el resto de construcciones presentaron averías.<br>En Neiva, Altamira y Suaza se reportó la destrucción de viviendas, así como agrietamiento de muros y techos de varias edificaciones. Se estima que en el departamento del Huila resultaron destruidos o averiados cerca de 8,000 inmuebles, incluyendo casas, edificios públicos, colegios, cuarteles de policía e iglesias. |
| 1967/07/29 | 6.8 | Betulia, Santander | Algunas viviendas de tapia pisada así como escuelas, iglesias y edificios públicos colapsaron en los municipios de Betulia, Hato, Zapatoca, Mogotes, San Vicente de Chucurí, Galán, El Guacamayo, San Joaquín y Palmar. |
| 1976/07/11 | 7.3 | Darién Darién-Panamá | En el municipio de Juradó varias viviendas y escuelas quedaron seriamente averiadas. En Riosucio, Bojayá y Bahía Solano se encontraron agrietamientos de los muros de algunas casas. Se evidenciaron efectos de licuación de suelos y deslizamientos a lo largo de la costa en dirección a la frontera con Colombia los cuales afectaron varios cultivos. |
| 1979/11/23 | 7.2 | Eje Cafetero | En Manizales se presentó el colapso de algunas viviendas y de un colegio y quedaron averiados importantes edificios. A su vez, el sismo detonó un deslizamiento que derrumbó algunas viviendas.<br>En Jardín y Andes colapsaron varias casas y los templos quedaron semidestruidos. En Pereira, Aguadas, Pueblo Rico, Támesis, Sonsón y Valparaíso fueron destruidas pocas viviendas.<br>En Medellín resultaron averiados un hospital, un teatro y varias casas. En Cali numerosas casas, una iglesia y edificios de oficinas presentaron daños considerables. En Armenia se agrietaron considerablemente algunas construcciones.<br>En Arma (corregimiento de Aguadas) se presentó un deslizamiento en el casco urbano que destruyó varias viviendas alrededor de la plaza principal. |

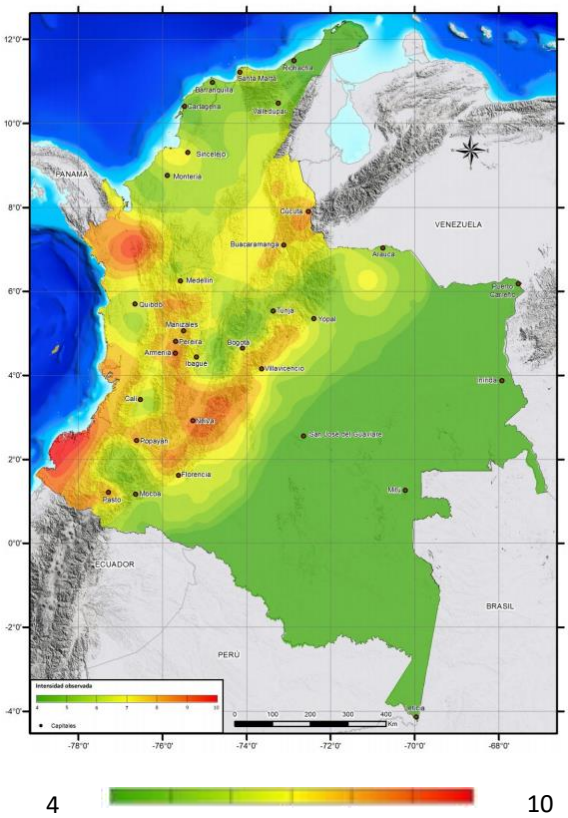
| Fecha | Magnitud (Mw) | Sitio relacionado | Descripción de daños |
|---|---|---|---|
| 1979/12/12 | 8.1 | Costa Pacífica, Pacífico | Este sismo generó un tsunami que afectó toda la costa comprendida entre Guapi al norte y Tumaco al sur, cuyas olas causaron destrucción de construcciones y viviendas y serios efectos en la población. |
| 1983/03/31 | 5.6 | Popayán, Cauca | Este sismo afectó al departamento del Cauca, principalmente las poblaciones de Cajete, Cajibío, Julumito, Popayán y Timbío. Se estima que en el departamento del Cauca alrededor de 4.964 construcciones quedaron destruidas y 13.796 viviendas presentaron daños muy graves. En Popayán, gran parte del patrimonio histórico arquitectónico del centro de la ciudad presentó daños severos y colapsos; asimismo se presentaron daños considerables en tuberías de agua potable. En los municipios de Cajete y Cajibío se estimó una destrucción del 80%. |
| 1992/10/18 | 7.1 | Murindó, Antioquia | En Murindó y en el pueblo indígena La Isla (Murindó), se presentó destrucción total de casi todas las construcciones. En Bojayá y Belén de Bajirá (departamento del Chocó), colapsaron viviendas. Otros daños severos se registraron en las poblaciones de Bejuquillo, Buchadó, Cañasgordas, Dabeiba, Mutata, Pavarandocito, San José de Urama y Vigía del Fuerte (departamento de Antioquia).<br>A raíz de los destrozos ocasionados por este evento se vio la necesidad de reubicar a los habitantes de Murindó.<br>Este sismo detonó fenómenos de licuación de suelos y procesos de remoción en masa, los cuales abarcaron una extensión de cientos de kilómetros del Atrato Medio y el Urabá antioqueño.<br>A su vez, este sismo detonó la explosión del volcán de lodo Cacahual localizado en el municipio de Turbo. Tal erupción sepultó algunas viviendas y causó daños en la cobertura vegetal, cultivos y ecosistemas. |
| 1995/01/19 | 6.5 | Tauramena, Casanare | Se presentaron colapsos y daños severos en las construcciones, especialmente en el área rural de los municipios de San Luis de Gaceno, Páez y Campohermoso en Boyacá y Sabanalarga y Monterrey en Casanare. En el área epicentral ocurrieron numerosos deslizamientos de diferente tipo que afectaron viviendas, vías y cultivos |
| 1995/02/08 | 6.4 | Calima (Darién), Valle del Cauca | Los municipios más afectados fueron El Cairo, La Unión, Bolívar, Trujillo, Calima y Ansermanuevo (Valle del Cauca). En Dosquebradas y Pereira (Risaralda) al igual que en San José del Palmar y Sipí (Chocó) se presentaron daños considerables en las construcciones. |
| 1999/01/25 | 6.1 | Eje Cafetero | Este sismo produjo daños severos en municipios de los departamentos de Quindío, Caldas, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca.<br>De acuerdo con el informe elaborado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL (CEPAL, 1999), cerca del 84% de las construcciones escolares presentaron daños entre mayores y colapsos. En el caso de instalaciones de salud, 61 instalaciones resultaron dañadas, de las cuales 52 presentaron daños leves, uno necesitó una reconstrucción parcial y ocho tuvieron que ser demolidas para su total reconstrucción. En cuanto a los daños a las viviendas, cerca de 79,500 resultaron afectadas, de las cuales casi 43,500 presentan daños parciales y alrededor de 36,000 quedaron entre inhabitables y destruidas. |
| 2004/11/15 | 7.2 | Bajo Baudó (Pizarro), Chocó | En el municipio de Bajo Baudó (Chocó), así como en varios caseríos aledaños se presentó la destrucción de viviendas, colapsos en escuelas, puentes, así como daños en capillas y puestos de salud.<br>En Buenaventura se presentó el colapso de construcciones, la mayoría de ellas palafíticas. En la zona epicentral se presentaron fenómenos de licuación y agrietamiento del suelo e inundaciones temporales asociadas a licuación |

Fuente: autores

Los daños presentados en la Tabla 1 permiten tener una aproximación sobre el potencial destructivo de los sismos en Colombia, así como una distribución geográfica de las zonas históricamente más afectadas. Se destacan el departamento de Norte de Santander en la frontera con Venezuela, la región del eje cafetero, la costa pacífica, al sur entre Nariño y Cauca, así como al norte en el departamento de Chocó. A su vez, se observan eventos importantes en los departamentos de Huila y Meta.

Con el fin de brindar una visión más completa de los eventos históricos, la Figura 1 presenta un mapa de intensidades máximas observadas en el país (SGC, 2015). Esta Figura resulta de la identificación, en cada punto de análisis, de las intensidades macrosísmicas máximas estimadas para todos los eventos compilados en la base de datos de sismicidad histórica del SGC.

De la Figura 1 se observa que las zonas con mayores intensidades (en la Escala Macrosísmica Europea), son similares a las descritas en la Tabla 1. Se resalta que a pesar de que este mapa no refleja información respecto a la frecuencia de ocurrencia de los sismos, presenta un resumen de la distribución geográfica de los eventos y de su impacto, la cual puede ser útil para el entendimiento de la amenaza sísmica.




4 10

**Figura 1. Mapa de intensidades máximas observadas para Colombia**

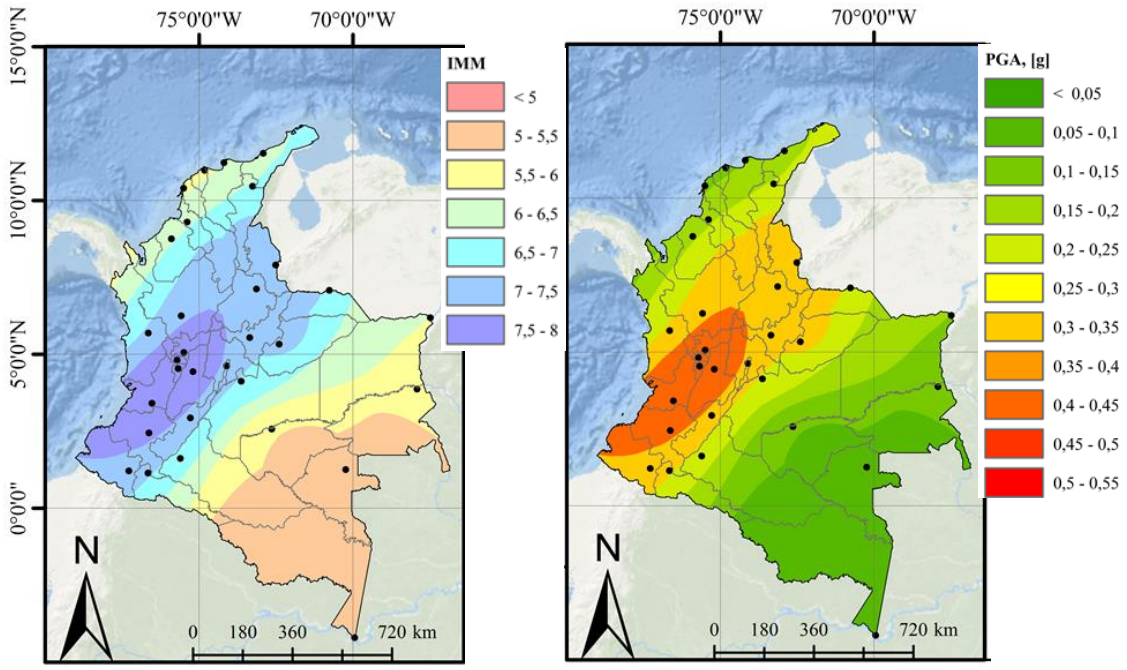
Fuente: SGC (2015)

## 1.2 Estudios previos de amenaza sísmica

Teniendo en cuenta la historia sísmica y el potencial destructivo de los sismos ocurridos en el país, es evidente la necesidad del desarrollo de modelos de amenaza que permitan estimar las posibles intensidades del movimiento y efectos a los cuales pueden estar expuestas la población y la infraestructura.

El estudio de la amenaza sísmica en el país ha sido un esfuerzo constante desde hace más de 50 años. Frente al desarrollo de catálogos sísmicos, Ramírez y Forero-Durán (1957) elaboraron un mapa sísmico y tectónico de Colombia, en el que se incluyen epicentros de principales sismos ocurridos (entre 1566 y 1956), así como la localización y características de las fallas.

Entre los primeros estudios de amenaza se encuentra el mapa elaborado por Estrada - Uribe y Ramírez (1977), en el que se presentan intensidades macrosísmicas esperadas en una ventana de observación de 100 años. Los valores de la Figura 2 b fueron obtenidos transformando la intensidad macrosísmica de Mercalli Modificada (MMI) del mapa presentado en la Figura 2 a, en aceleraciones pico usando la relación propuesta por Wald et ál. (1999).




(a) Intensidades macrosísmicas (b) Aceleración pico

**Figura 2. (a) Mapa de intensidades macrosísmicas esperadas; (b) aceleración pico. Ventana de observación de 100 años**

Fuente: adoptado de AIS-Uniandes-Ingeominas (1996)

**Nota:** se resalta que el mapa del valor esperado de las intensidades de la Figura 2 corresponde a los valores interpolados obtenidos de las isolíneas de intensidades macrosísmicas evaluadas por Estrada y Ramírez (1977). Por lo tanto, pueden presentarse diferencias con los valores originales. Esta figura se considera de referencia. Mayores detalles de evaluaciones de amenaza realizadas entre 1972 y 1996 se presentan en AIS-Uniandes-Ingeominas (1996).

En la Figura 2 se observa que las mayores intensidades macrosísmicas (cercanas a 8), se identificaron hacia el suroccidente del país. Las zonas de intensidades cercanas a 7 cubren la cordillera de Los Andes. Por último, en las zonas de los Llanos Orientales y de la Amazonía, así como en la Costa Atlántica se obtuvieron los menores valores de la intensidad esperada. En términos de aceleraciones pico, para un período de observación de 100 años, se encuentra que pueden variar entre 0.4 y 0.5 g para las zonas de mayor aceleración, entre 0.3 y 0.4 g para las zonas de cordillera, y menores a 0.2 g en las zonas de la región amazónica.

Como respuesta a los daños del terremoto de Popayán en 1983, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) llevó a cabo un análisis probabilista de amenaza. Para dicho estudio se utilizó un catálogo de sismos compilado y procesado por el Instituto Geofísico de los Andes y la firma ITEC Ltda. para el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS). Los sismos de dicho catálogo se asignaron a 22 fuentes símicas que comprenden las zonas de subducción y Benioff, así como un conjunto de fallas geológicas. Por su parte, para el cálculo de intensidades del movimiento se utilizaron las ecuaciones de atenuación de Donovan (1973) y McGuire (1974). Mayores detalles de este estudio se encuentran en García et ál. (1984).

En la Figura 3 se presentan valores interpolados de la aceleración horizontal máxima esperada, considerando un periodo de exposición de 50 años, una probabilidad de excedencia del 10% y una corrección por incertidumbre del 90%. los cuales corresponden a un periodo de retorno de 475 años.

Los resultados del estudio de García et ál. (1984) sirvieron de referencia para definir los mapas de coeficientes de aceleración pico efectiva (Aa) del Código colombiano de construcciones sismo resistentes (CCCSR -84), adoptado según el decreto 1400/1984.

Se resalta que en la obtención de coeficientes de diseño sismo resistente se involucran, además de los análisis de amenaza sísmica, criterios de índole económica, social e ingenieril. Por esta razón, los mapas de coeficientes sísmicos de las normas sismo resistentes pueden ser diferentes a los resultados “crudos” obtenidos de la modelación de la amenaza.

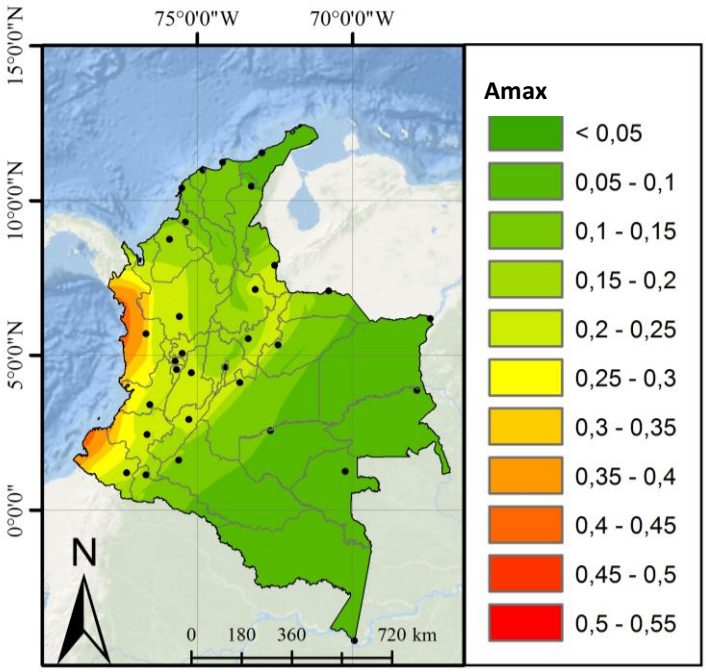



**Figura 3. Valores de aceleración horizontal máxima esperada. Tiempo de exposición 50 años; probabilidad de excedencia de 0.1; corrección por incertidumbre del 90%**

Fuente: adoptado de García et ál. (1984).

**Nota:** La Figura 3 corresponde a los valores interpolados de las isolíneas de aceleración horizontal máxima esperada (Figura 6.3 de García et ál., 1984). Pueden presentarse diferencias con los valores originales estimados en dicho estudio. Estos valores se consideran de referencia.

En la Figura 3 se encuentra que, la distribución geográfica de la amenaza considerada para el CCSR-84, se asemeja más a la historia de eventos descrita según las intensidades máximas observadas (ver Figura 1), lo cual se explica, en parte, al uso de un catálogo sísmico.

Posteriormente, en 1996 el Comité AIS 300, con la participación de la Universidad de Los Andes y del Instituto Colombiano de Geología y Minería - Ingeominas (ahora Servicio Geológico Colombiano), llevaron a cabo un estudio probabilista de la amenaza sísmica (ver detalles en AIS-UNIANDES-INGEOMINAS, 1996).

En este estudio se elaboró un catálogo de eventos en el que se integraron diferentes fuentes de información, incluyendo catálogos de estudios previos y los datos provenientes de la Red Sismológica Nacional de Ingeominas. Para el análisis se consideraron 32 sistemas de fallas y se utilizaron las ecuaciones de atenuación propuestas por Donovan (1973) y McGuire (1974).

En cuanto al cálculo de la amenaza, se establecieron diferentes alternativas para la asignación de eventos a las fuentes sísmicas (fallas), así como para la estimación de la magnitud máxima de las fuentes a partir de relaciones empíricas entre la longitud de

ruptura de la falla y la magnitud máxima. De esta manera, se realizaron 25 evaluaciones de la amenaza según diferentes alternativas de análisis.

Los resultados de este estudio fueron la base para que la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes, definiera los coeficientes sísmicos de diseño de la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98. La Figura 4 presenta los valores promedio (crudos) de la aceleración pico efectiva para un periodo de retorno de 475 años. Estos valores sirven de referencia para conocer la distribución geográfica de la amenaza sísmica.

En la Figura 4 se observan similitudes con el modelo planteado para el CCSR-84 en términos de la mayor peligrosidad en la costa pacífica, en la cual se observan valores de aceleración pico efectiva de hasta 0.5 g, considerando un período de retorno de 475 años. Para la zona de Santander y Norte de Santander se estimaron valores de aceleración pico efectiva cercanos a 0.3 g.

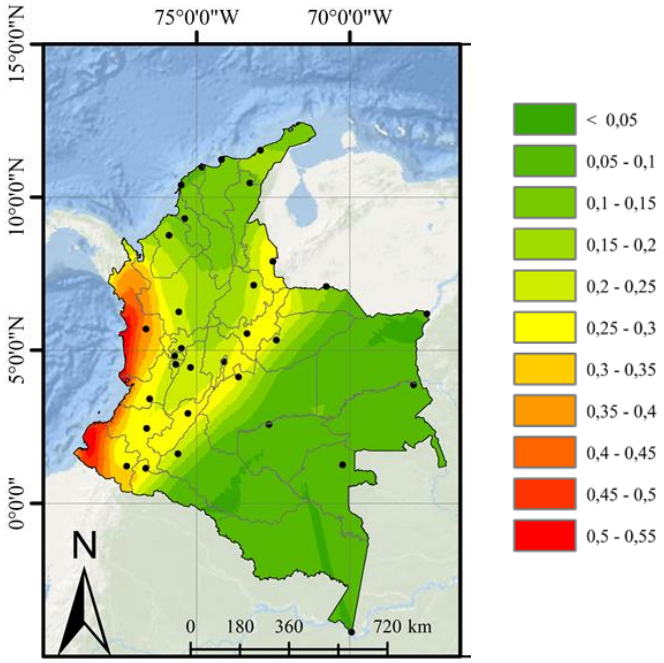



**Figura 4. Mapa del valor promedio de aceleraciones pico efectivas. Periodo de retorno 475 años.**

Fuente: adoptado de AIS-Uniandes-Ingeominas (1996)

**Nota:** La Figura 4 corresponde a los valores interpolados obtenidos de las isolíneas de aceleración pico efectivas (valor promedio) presentadas en el Anexo L (Figura L.5) del Estudio general de amenaza sísmica AIS-Uniandes-Ingeominas (1996). Por lo tanto, pueden presentarse diferencias con los valores originales estimados en dicho estudio.

Posterior a las modelaciones de amenaza para la NSR-98, el SGC y la Universidad Nacional de Colombia llevaron a cabo un modelo de amenaza sísmica bajo un enfoque probabilista, el cual se construyó a partir de información histórica, instrumental, geológica, sismotectónica y considerando la base de datos de sismos disponible para la época (Ingeominas – Universidad Nacional, 2010).

En este estudio se realizó una depuración y análisis de un catálogo sísmico utilizando la información más reciente de la red sismológica nacional del SGC. A su vez, la sismicidad del país se clasificó en los siguientes ambientes tectónicos: zona cortical (superficial), zona de subducción y de sismicidad intermedia (sobre el nido sísmico de Bucaramanga). La Figura 5 presenta los resultados de aceleración pico obtenidos para un periodo de retorno de 475 años.

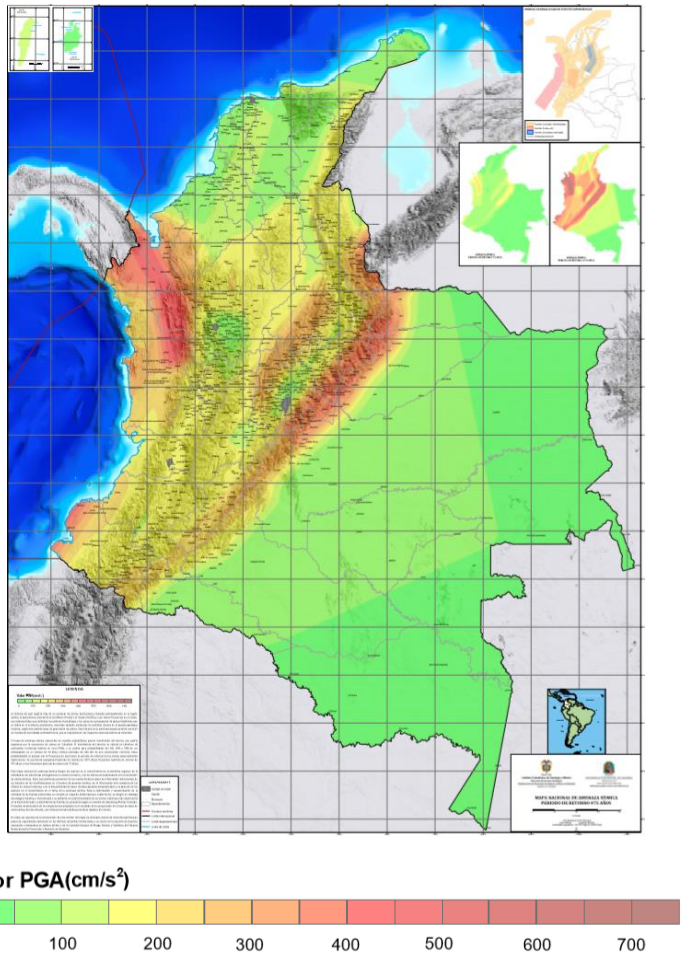



**Figura 5. Mapa nacional de amenaza sísmica. Periodo de retorno 475 años**

Fuente: Ingeominas – Universidad Nacional (2010)

Por su parte, el Comité AIS 300 realizó una evaluación de la amenaza sísmica nacional, con el fin de definir los movimientos sísmicos de diseño del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10 (ver AIS 2009; MAVDT 2010).

En AIS (2009) se depuró el catálogo sísmico suministrado por Ingeominas en 2009. Las fuentes sísmicas superficiales se modelaron como "corredores" (de ancho de 60 km) a lo largo de principales fallas identificadas (fuentes tipo área). A su vez, se consideraron fuentes tipo área para modelar fuentes profundas asociadas a los procesos de subducción del pacífico, a la zona de Benioff y al nido sísmico de Bucaramanga.

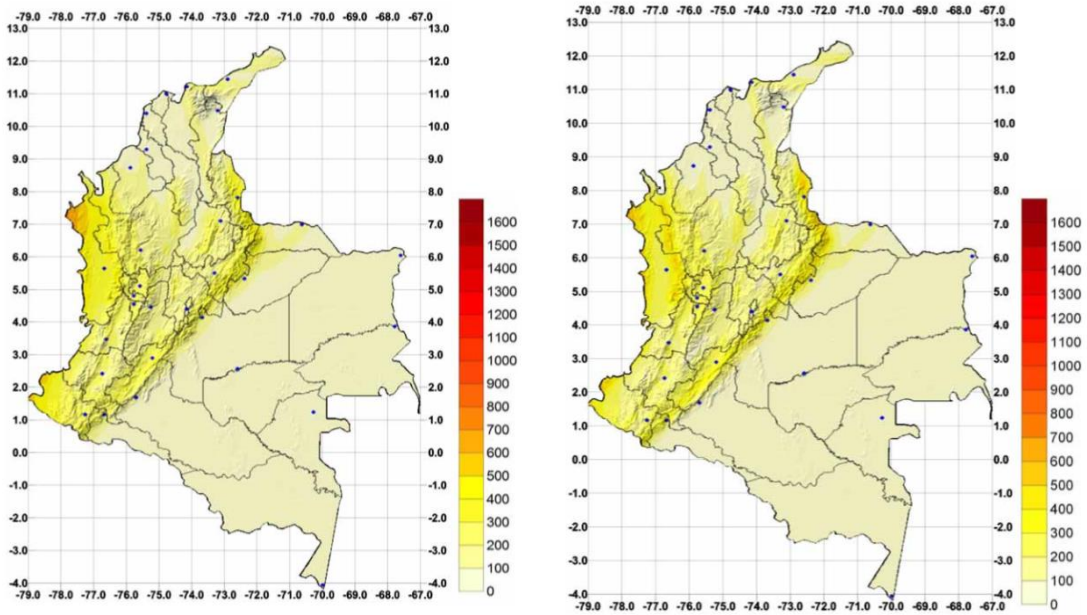
Para cada ambiente se llevó a cabo una revisión y selección de ecuaciones de atenuación según una evaluación del sesgo y desviación estándar de los residuales obtenidos entre las aceleraciones observadas y las estimadas mediante las ecuaciones de atenuación. Como resultado, se seleccionaron las ecuaciones de Campbell (1997) para las zonas cortical y de subducción. y García et ál. (2005) para la zona de Benioff.

A pesar de que las ecuaciones de Gallego (2000) no presentaban el mejor comportamiento (según el análisis de sesgos realizado), éstas fueron utilizadas, tal como lo señalan los autores del estudio AIS (2009), por haber sido ampliamente usadas en estudios previos y debido a su buen comportamiento frente a las intensidades observadas durante el sismo del Eje Cafetero en 1999.

Como complemento al análisis probabilista, en el estudio AIS (2009) se llevó a cabo un análisis determinista en el cual se evalúo la aceleración máxima utilizando sismos históricos como fuentes sísmicas y las ecuaciones de atenuación de Donovan (1973).

En el estudio AIS (2009) se obtuvieron, para un período de retorno de 475 años, aceleraciones espectrales para los siguientes periodos de vibración: 0.1, 0.3, 0.5, 1 y 2 segundos. Asimismo, se elaboraron mapas de aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos del terreno para los siguientes períodos de retorno 31, 225, 475, 1000 y 2500 años; para ambos casos, se consideraron las ecuaciones de atenuación de Gallego (2000), así como las de Campbell (1997) y García (2005).

La Figura 6 presenta aceleraciones máximas estimadas considerando (a) la ecuación de atenuación de Gallego (2000) y (b) el modelo de atenuación Campbell 1997- García 2005. Los resultados de este estudio se encuentran publicados en Salgado et ál. (2010).




(a) Ecuación de atenuación de Gallego (2000)

Modelo de atenuación Campbell 1997-García 2005

**Figura 6. Aceleración pico para periodo de retorno de 475 años (a) Ecuación de atenuación de Gallego (2000); (b) Ecuación de atenuación de Campbell 1997 – García (2005).**

Fuente: AIS (2009)

En la Figura 6 se observa una distribución similar a la obtenida en los estudios de AIS-Uniandes-Ingeominas y García et ál. (1984). Las zonas de mayor amenaza se encuentran al norte del departamento de Nariño y de Chocó, así como en el departamento de Norte de Santander y Arauca en la frontera con Venezuela. Para estas zonas, las aceleraciones pico varían entre 0.4 y 0.5 g.

Entre las evaluaciones más recientes de amenaza sísmica se encuentra el modelo generado por Bernal (2014), el cual incluyó el desarrollo de ecuaciones de atenuación para el país siguiendo un enfoque de espectro de fuente. Estos resultados se usaron para la definición de parámetros de diseño de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 (Mintransporte, 2015), y fueron publicados por Salgado et ál. (2016).

De los antecedentes en la evaluación de la amenaza sísmica en Colombia se destaca la consideración de diferentes alternativas de análisis en el modelo AIS-Uniandes-Ingeominas (1996), así como la evaluación de ecuaciones de atenuación llevada a cabo en los modelos de Ingeominas-Universidad Nacional (2010) y AIS (2009).

Teniendo en cuenta las anteriores experiencias, el SGC considera que mejoras en el entendimiento y modelación de la amenaza sísmica pueden enfocarse (entre otros) en los siguientes tópicos:

- Inclusión de criterios geofísicos, de información geológica, tectónica y del catálogo de eventos sísmicos para una mejor definición de la geometría de fuentes sísmicas.
- Consideración de modelos de sismicidad suavizada con el fin de reducir la subjetividad en la definición de la geometría de fuentes utilizadas bajo modelos de sismicidad equiprobable.
- Caracterización de fallas activas para la modelación de fuentes sísmicas superficiales desde un punto de vista tectónico.
- Revisión de la geometría y parámetros de sismicidad de las fuentes de subducción.
- Evaluación y selección de ecuaciones de atenuación que mejor representen las intensidades del movimiento observadas según los diferentes ambientes tectónicos.

Considerando los anteriores tópicos, y con el fin de contribuir al conocimiento de la amenaza sísmica del país, el SGC en conjunto con la Fundación Global Earthquake Model (GEM), llevaron a cabo un modelo de amenaza sísmica cuyas principales características y resultados se describen en el presente estudio.

## 1.3 Estructura del informe y del modelo de amenaza sísmica

La Figura 7 presenta un esquema metodológico del modelo de amenaza sísmica y de la estructura del presente estudio. El capítulo 2 presenta los objetivos y alcances; en el capítulo 3 se describen las fuentes de información e insumos para la construcción del modelo de amenaza sísmica, las cuales corresponden a la conformación de un catálogo sísmico integrado, una base de datos de fallas activas y a una base de datos de movimiento fuerte.

El Capítulo 4 se dedica a la definición de las fuentes sísmicas, su caracterización sismotectónica, su distribución geográfica y la definición de relaciones de recurrencia de magnitudes. Al respecto, se realiza una caracterización de la sismicidad según ambientes tectónicos, se describe el tipo de fuentes sísmicas y se estiman sus parámetros de sismicidad (a partir de los datos del catálogo sísmico integrado o usando criterios tectónicos).

Se consideran diferentes alternativas para modelar la sismicidad superficial (mediante fallas activas, modelos de sismicidad suavizada y modelos de sismicidad equiprobable). A su vez, para modelar la sismicidad interplaca del pacífico se consideran diferentes fuentes según profundidades de los eventos y segmentación de las fuentes. Similarmente, para la zona de Benioff se consideran diferentes fuentes según la profundidad de los eventos. Las anteriores alternativas de modelación se resumen en un árbol lógico de fuentes sísmicas.

En el capítulo 5 se detalla el proceso de selección de las ecuaciones de atenuación que se utilizarán para calcular las intensidades del movimiento. Para cada ambiente tectónico se preselecciona un conjunto de ecuaciones, las cuales se evalúan según su ajuste con los datos observados (disponibles en la base de datos de movimiento fuerte). Como resultado se define un árbol lógico de ecuaciones según ambiente tectónico.

La metodología de cálculo de la amenaza sísmica se describe en el capítulo 6. Por último, los resultados de la estimación probabilista de la amenaza sísmica nacional se presentan en el capítulo 7.

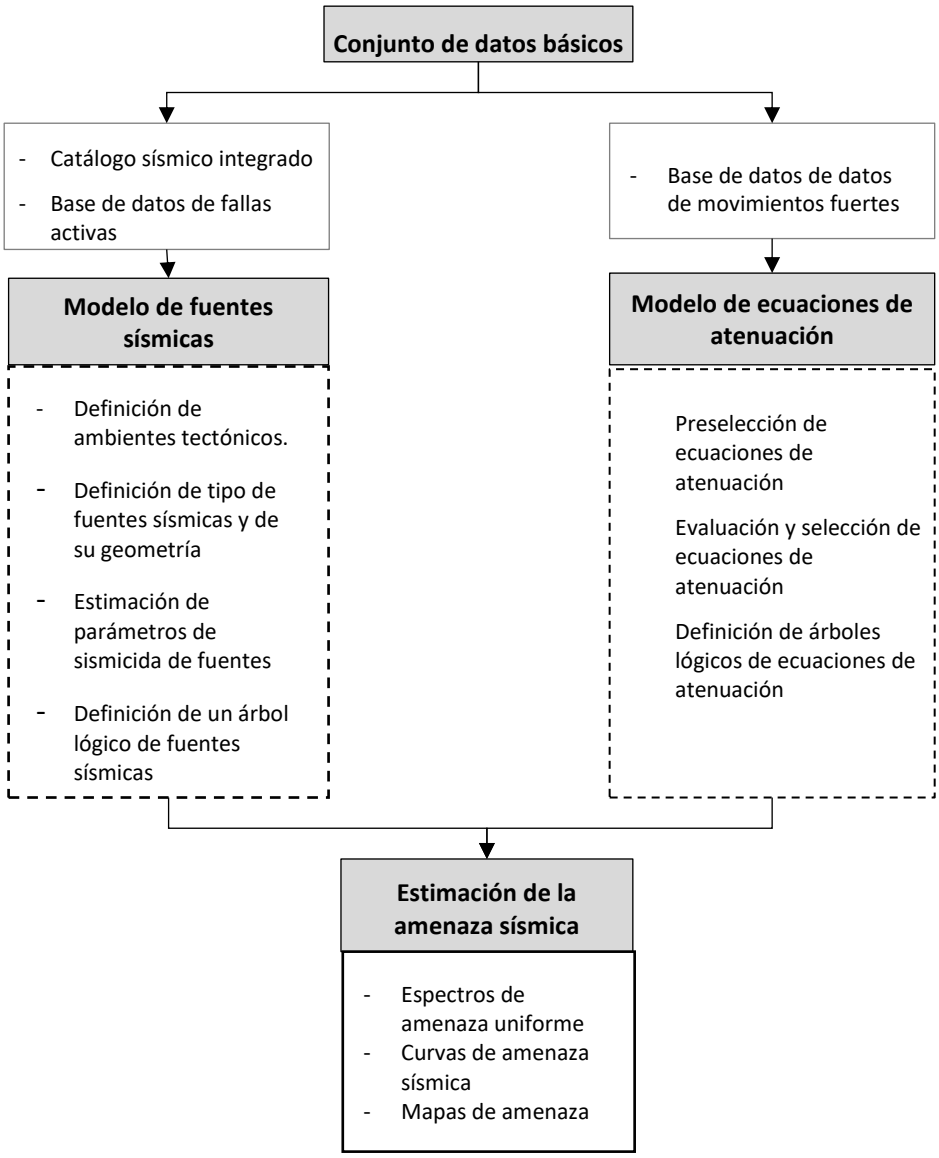



**Figura 7. Esquema metodológico del modelo de amenaza sísmica**

Fuente: autores

# 2. OBJETIVOS Y ALCANCE

## 2.1 Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo general elaborar un modelo probabilista de amenaza sísmica para Colombia. Los objetivos específicos son los siguientes:

*Consolidación de datos básicos para el análisis*

- Crear un catálogo integrado de eventos sísmicos, considerando los eventos registrados por la red sismológica nacional, registros de eventos históricos, así como catálogos internacionales.
- Consolidar una base de datos de fallas activas con información relevante para la modelación de la amenaza sísmica.
- Conformar una base de datos de movimiento fuerte, a partir de registros de la red nacional de acelerógrafos del SGC.

*Definición de fuentes sísmicas*

- Definir ambientes tectónicos y clasificar la sismicidad según estos ambientes.
- Para cada ambiente tectónico, identificar el tipo de fuentes sísmicas adoptadas para la modelación y establecer principales supuestos.
- Modelar la sismicidad superficial a partir de modelos de sismicidad alternativos (equiprobable y de sismicidad suavizada). Complementar los análisis con información de fallas activas.
- Proponer una geometría de las fuentes sísmicas asociadas al proceso de subducción del pacífico, así como para la zona de Benioff y del nido sísmico de Bucaramanga, teniendo en cuenta la distribución geográfica de magnitudes y profundidades de las fuentes.
- Estimar los parámetros de sismicidad de las fuentes identificadas en el estudio.
- Elaborar un árbol lógico de fuentes sísmicas en el que se consideren incertidumbres asociadas a la definición de las fuentes y el estado actual del conocimiento.

*Selección de ecuaciones de atenuación*

- Para cada ambiente tectónico reconocido, preseleccionar un conjunto de ecuaciones de atenuación aplicables para la estimación de la intensidad del movimiento del terreno, considerando desarrollos recientes, modelos existentes en la literatura técnica y criterios objetivos para tal preselección.

- Para las ecuaciones de atenuación preseleccionadas, realizar un proceso de selección cuantitativo para identificar aquellas ecuaciones que mejor se ajusten a las intensidades del movimiento observadas.
- Elaborar un árbol lógico de ecuaciones de atenuación para cada ambiente tectónico.

*Evaluación de la amenaza sísmica*

- Obtener mapas de aceleraciones espectrales a escala nacional, para diferentes períodos de vibración y diferentes períodos de retorno.
- Estimar curvas de excedencia de intensidades del movimiento, así como espectros de amenaza uniforme para una malla de puntos en el país.

## 2.2 Alcances y limitaciones

En este estudio de amenaza sísmica se estiman probabilidades de excedencia para diferentes intensidades del terreno dado un periodo de exposición. Las intensidades del terreno se expresan en términos de aceleraciones espectrales, las cuales se calculan a nivel de roca firme, con velocidad de onda de corte promedio en los 30 m superficiales de 760 m/s. En este estudio no se presentan estimaciones de amenaza sísmica considerando efectos de sitio.

A continuación, se presentan alcances y limitaciones en términos del área de estudio, los insumos utilizados, la metodología de cálculo y los resultados obtenidos.

**Área de estudio:** La estimación de amenaza se lleva a cabo para una malla de puntos que abarca el territorio colombiano. A su vez, se obtienen curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme para los centros poblados del país, de acuerdo con la información cartográfica disponible en el Marco Geoestadístico Nacional del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

**Insumos para el análisis de amenaza sísmica:** Para la elaboración del modelo de amenaza sísmica se utilizaron diversas fuentes de información, tanto para la caracterización de las fuentes sísmicas (dónde ocurren los sismos y cuáles son sus características), como para el cálculo de las intensidades del movimiento dada la ocurrencia de sismos (utilizando diferentes ecuaciones de atenuación). Descripciones generales de los datos utilizados se presentan a continuación. Mayores detalles sobre los insumos básicos utilizados para la modelación de la amenaza sísmica se presentan en el capítulo 3.

*Catálogos sísmicos*: se recopiló información de catálogos sísmicos de diferentes instituciones de orden global y nacional. Los datos utilizados corresponden a los disponibles a septiembre de 2014.

*Base de datos de movimiento fuerte:* se recopiló y procesó información de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia, registrada entre junio 1994 y abril de 2017. A su vez, se consideró información registrada por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica de Ecuador respecto al sismo de Pedernales del 16 de abril de 2016 y sus réplicas.

*Información geológica y sismológica*: Para la definición de fuentes sísmicas corticales se emplearon datos geológicos recientes en cuanto a la definición del límite de Mohorovičić, así como resultados de estudios la anomalía de Bouguer, espesor de la corteza y gradiente térmico. Por su parte, se utilizó información tanto del SGC como de instituciones globales respecto a mecanismos focales de los sismos y trayectorias de máximos esfuerzos.

*Base de datos de fallas activas:* Se cuenta con una base de datos de fallas activas en la que se incluye información respecto a la geometría y características geodinámicas de las fallas, las cuales son útiles para la caracterización de su sismicidad.

**Metodología de análisis:** para el cálculo de la amenaza sísmica se adopta una metodología probabilista. Entre los principales supuestos del modelo se encuentra la independencia entre eventos, de tal manera que la ocurrencia de un sismo no afecta las probabilidades de ocurrencia de otro. Bajo este supuesto, la ocurrencia de sismos se modela mediante una distribución de Poisson, en la cual se asume que la tasa de ocurrencia de sismos es constante en el tiempo. En el presente estudio no se consideran modelos de sismicidad que dependan del tiempo.

Teniendo en cuenta que pueden existir diferentes alternativas de modelación de la amenaza según métodos de cálculo, diferentes propuestas de la geometría de las fuentes sísmicas y diferentes ecuaciones de atenuación aplicables, se elaboró un árbol lógico en el que se definen múltiples casos de análisis y se les asignan diferentes pesos según el criterio de los autores.

**Uso de los resultados:** Los resultados del presente estudio corresponden a mapas de amenaza, curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme. Estos resultados pueden ser utilizados como referencia para actividades de conocimiento y reducción del riesgo sísmico, así como para el fortalecimiento de capacidades ante desastres a escalas nacional y regional, a nivel de factibilidad.

Los resultados del presente estudio en ningún caso reemplazan los coeficientes sísmicos de diseño establecidos en algún reglamento de diseño sismo resistente, o bien los resultados de estudios específicos llevados a cabo para obras de infraestructura.

# 3. CONJUNTO DE DATOS BÁSICOS

En Colombia, la información existente sobre sismos es de diferente índole. Por un lado, se cuenta con datos de carácter histórico y geográfico, a partir de los cuales se infiere la localización y severidad de eventos ocurridos en épocas en las cuales no se contaba con instrumentos para su registro. Por otro lado, existen bases de datos provenientes de redes instrumentales, a través de las cuales se obtienen parámetros objetivos que describen los sismos.

A su vez, en el país existe información derivada de la observación geológica, mediante la cual es posible localizar fallas, describir su geometría y estimar su actividad sísmica. De la compilación y análisis de los datos existentes, es deseable elaborar modelos y estimaciones que permitan a la comunidad en general estar al tanto de la amenaza sísmica a la que está expuesta. Tales actividades hacen parte de las funciones del Servicio Geológico Colombiano (SGC), en cuanto a la integración de conocimientos, compilación de información y evaluación de amenazas geológicas.

Con base en el conocimiento actual del SGC, no es posible determinar con exactitud dónde y cuándo se presentarán sismos, ni las intensidades del movimiento que éstos generarán en el territorio. Ante esta limitación, en el presente estudio se adopta una metodología probabilista mediante la cual es posible obtener (entre otros resultados), el valor promedio y rangos de variación de las intensidades del movimiento para determinados periodos de retorno.

En este capítulo se presenta el conjunto de datos básicos que respaldan el modelo y las estimaciones de amenaza sísmica obtenidas para Colombia. Por un lado, se describe la elaboración de un Catálogo Sísmico Integrado, el cual corresponde a la compilación y análisis de información de sismos que se han presentado en la zona de estudio, en cuanto a su localización, magnitud, profundidad, entre otras características. Entre los objetivos de la elaboración de dicho catálogo se encuentra obtener una adecuada cobertura espacial y temporal de eventos, de tal manera que se tenga información suficiente para definir la geometría de las fuentes sísmicas, así como para caracterizar su tasa de actividad.

Como complemento a la definición de fuentes sísmicas, en este capítulo se presenta una base de datos de fallas activas, la cual corresponde a la caracterización sistemática de la geometría y características geodinámicas de fallas activas identificadas Colombia.

Por otro lado, se describe la información disponible y el procesamiento de los registros acelerográficos de sismos ocurridos en la zona de estudio. Esta información permite conocer las intensidades producidas por tales eventos en diferentes puntos de observación. A partir de estos datos es posible realizar simplificaciones para calcular de

manera aproximada las aceleraciones esperadas en un sitio de análisis, dada la ocurrencia de un sismo de ciertas características, a una distancia dada.

## 3.1 Catálogo Sísmico Integrado

El SGC elaboró un Catálogo Sísmico Integrado (CSI), a partir de la compilación y revisión de información de sismos registrados en diferentes catálogos globales y nacionales. Para la elaboración del CSI se llevaron a cabo las siguientes actividades:

(i) priorización de catálogos; que corresponde a la selección de la información más confiable de cada catálogo y remoción de soluciones (eventos) duplicados;
(ii) homogenización del tipo de magnitud a momento sísmico (Mw), incluyendo información de estudios de sismicidad histórica desarrollados por el SGC;
(iii) remoción de eventos dependientes;
(iv) análisis de completitud.

En las siguientes secciones se presentan los catálogos sísmicos utilizados, los procedimientos de integración y homogenización de datos, así como los principales resultados del CSI.

### 3.1.1 Catálogos sísmicos utilizados

Para la construcción del CSI se utilizaron catálogos de agencias globales y nacionales. Los catálogos globales consultados fueron los siguientes:

- *EHB*: Engdahl, van der Hilst and Buland catalogue (ISC, 2012; Engdahl et ál. 1998);
- *ISC –GEM*: International Seismological Centre – Global Earthquake Model (Di Giacomo *et ál*. 2014; Storchak et ál. 2013).
- *ISC*: International Seismological Centre (ISC) (Bondar & Storchak, 2011).
- Centennial (Engdahl & Villaseñor, 2002).
- *ANNS Composite (ANSS) (NCEDC, 2013).*
- *NEIC* - ANSS Comprehensive (USGS, 2014).
- *GCMT*: Global Centroid Moment Tensor Catalog (GCMT) (Dziewonski et ál. 1981; Ekström et ál. 2012; Storchak et ál. 2013).
- *IDC* Centro Internacional de Datos (IDC) (ISC, 2015).

Los catálogos nacionales utilizados fueron los siguientes:

- *SGC*: Servicio Geológico Colombiano -SGC (Colombia).
- *IGEPN*: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica - (Ecuador) (Beauval, et ál. 2013).
- *CASC*: Centro Sismológico de América Central (Alvarenga et ál., 1998).
- *FUNVISIS*: Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (Venezuela).
- *INETER*: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2016)

La Tabla 2 resume las principales características de cada uno de los catálogos consultados. Se señala que el número de eventos de cada catálogo corresponde al número de sismos considerados para el desarrollo del CSI del modelo nacional de amenaza sísmica de Colombia. A continuación, se presenta una breve descripción de los catálogos consultados.

**Tabla 2 Características generales de la información usada de los catálogos globales y locales en la construcción del catálogo integrado**

| Catálogo | Rango de fecha | | Tipo de magnitud | No. de eventos |
|---|---|---|---|---|
| | Desde | Hasta | | |
| EHB | 1906 | 2009 | mb | 2,140 |
| | | | Ms | |
| ISC - GEM | 1906 | 2012 | Mw | 664 |
| ISC | 1904 | 2012 | Ms | 19,217 |
| | | | mb | |
| Centennial | 1901 | 1959 | Mw | 57 |
| | | | mB | |
| | | | Ms | |
| | | | Unk | |
| ANNS | 1930 | 1972 | mb | 1,790 |
| | | | Ms | |
| | | | Unk | |
| NEIC | 1973 | 2014 | Mw | 8,320 |
| | | | Ms | |
| | | | mb | |
| | | | me | |
| GCMT | 1976 | 2014 | Mo | 703 |
| IDC | 2013 | 2014 | mb | 290 |
| SGC | 1993 | 2014 | ML | 23,336 |
| | | | Mw | |
| IGEPN | 1994 | 2009 | Md | 3,899 |
| CASC | 1992 | 2013 | mb | 751 |
| | | | md | |
| | | | Mw | |
| FUNVISIS | 2008 | 2009 | Md | 647 |
| INETER | 2008 | 2013 | Mw | 7 |

Fuente: autores

**Nota**: Tipos de magnitudes consideradas: magnitud de ondas de cuerpo – periodo corto (mb); magnitud de ondas de cuerpo – Banda ancha (mB); magnitud de ondas superficiales (Ms); magnitud de energía (me)

Mo: momento sísmico escalar; magnitud local (ML) magnitud momento (Mw); magnitud de duración (Md); desconocida (Unk).

#### 3.1.1.1 *EHB* - Engdahl, van der Hilst and Buland catalogue

Corresponde a una versión ajustada del Boletín del Centro Internacional de Sismología (ISC) y contiene datos entre 1960 y 2008. En el catálogo EHB se utilizó el algoritmo de Engdahl et ál. (1998) para mejorar las localizaciones hipocentrales de sismos anteriores al año 2009 y registrados en los siguientes catálogos: International Seismological Summary (ISS), ISC y Preliminary Determination of Epicenters (PDE). La mayoría de las magnitudes tipo Ms y mb son tomadas del ISC. Para el presente estudio se usaron eventos de magnitudes mayores a 3.0. Los eventos del catálogo EHB se obtuvieron a través del sitio de consulta del ISC (ISC, 2012).

#### 3.1.1.2 ISC-GEM

Este catálogo resulta del trabajo conjunto entre el Centro Internacional de Sismología (ISC) y la Fundación Global Earthquake Model (GEM), en el cual se realizaron mejoras y refinamientos a la distribución de la sismicidad y de magnitudes. Este catálogo también integra información de magnitudes de otras agencias como el Global Centroid Moment Tensor Catalog - GCMT (Di Giacomo et ál., 2014; Storchak et ál., 2013). Para la construcción del catálogo ISC - GEM se usaron procesos estandarizados de relocalización homogénea para eventos ocurridos entre 1900 y 2009. A su vez, se recalcularon magnitudes tipo Ms y mb, y mediante relaciones de conversión se calcularon magnitudes Mw. Los eventos del catálogo ISC-GEM se obtuvieron a través del sitio de consulta del ISC (ISC, s/f a).

#### 3.1.1.3 ISC–REV - Boletín sísmico revisado del Centro Internacional de Sismología

El boletín del ISC contiene información de sismos ocurridos a partir de 1900 hasta la fecha. El Boletín revisado del ISC cuenta con revisiones manuales llevadas a cabo por analistas del ISC en los casos en los que se cuenta con información suficiente. Tal revisión se ejecuta para eventos de magnitud ≥ 2.5 que cumplan con los siguientes criterios: que el hipocentro o datos de arribo sean reportados por más de una agencia; que la configuración de alguna estación no sea aceptable; o bien, que un conjunto de estaciones mejoren la caracterización del evento, comparada con la información que puede suministrar una sola agencia. A su vez, todos los eventos con magnitudes mayores a 3.5 son revisados (ISC s/f b). Por su parte, los sismos se localizan usando un algoritmo descrito en Bondar & Storchak (2011). Los eventos de este catálogo se obtuvieron a través del sitio de consulta del ISC (ISC, s/f c).

#### 3.1.1.4 CENT - Centennial

Contiene información de varios catálogos de sismos registrados instrumentalmente desde 1900 hasta 2008. Para cada evento se cuenta con una única magnitud homologada y corregida. A su vez, este catálogo cuenta con una relocalización de eventos según el algoritmo de Engdahl et ál. (1998), en los casos en los que existe información suficiente. Este catálogo tomó como partida el generado por Engdahl y Villaseñor (2002), con periódicas actualizaciones. Los eventos del catálogo Centennial se obtuvieron a través del sitio de consulta del Servicio Geológico de Estados Unidos -USGS (USGS, s/f).

#### 3.1.1.5 NEIC (ANSS – NEIC) - Centro Nacional de información sobre sismos del Servicio Geológico de Estados Unidos

Este catálogo contiene información de parámetros de fuente sísmica y otro tipo de información aportada por diferentes redes sísmicas. Está compuesto por datos del Advanced National Seismic System (ANSS) hasta 1972 y del NEIC a partir de 1973. Actualmente, dentro de este catálogo está integrada información de catálogos tales como GCMT, además de información proveniente del PDE (Preliminary Determination of Epicenters Bulletin) (USGC, 2014). Los eventos de este catálogo se obtuvieron a través del sitio de consulta del USGS (USGS, s/f. b).

#### 3.1.1.6 GCMT - Global Centroid Moment Tensor Catalogue

El catálogo del GCMT contiene el cálculo de tensores de momento sísmico para sismos de magnitudes mayores a 5.5 (Storchak et ál., 2013). Este catálogo abarca eventos ocurridos a partir de 1976, para los cuales se cuenta con información de sus mecanismos focales (GCMT, 2013). El catálogo del GCMT se encuentra en un formato ASCII (conocido como formato “ndk”) y reporta magnitudes Ms y mb. No obstante, es posible obtener la magnitud Mw a partir de la información del momento sísmico incluido en dicho formato. Los eventos de este catálogo se obtuvieron a través del sitio de consulta del GCMT (GCMT, 2017).

#### 3.1.1.7 IDC - Centro Internacional de Datos

El Centro Internacional de Datos (IDC) hace parte del Tratado de Prohibición de Ensayos Nucleares (CTBTO) y está diseñado para recolectar, procesar, analizar y reportar datos recibidos del Sistema Internacional de Monitoreo (IMS). El umbral de detección de sismicidad del IDC es para magnitudes cercanas a 4.0 (mb). Los eventos sísmicos no relacionados con pruebas nucleares son reportados al ISC (ISC, 2015).

Los eventos de este catálogo se obtuvieron a través del sitio de consulta del boletín del ISC (ISC s/f c). Para la búsqueda de estos eventos, en la sección de parámetros opcionales de consulta, se seleccionó la opción “IDC” en el campo de autor de la magnitud.

#### 3.1.1.8 GUTE - Catálogo Gutenberg – Richter

De acuerdo con Engdahl y Villaseñor (2002), entre las bases de datos más relevantes para la descripción de sismos ocurridos antes de 1950 se encuentra el catálogo elaborado por Gutenberg y Richter (1954), el cual contiene hipocentros y magnitudes para sismos importantes ocurridos entre 1904 y 1952.

Los eventos de este catálogo se obtuvieron a través del sitio de consulta del boletín del ISC (ISC s/f c). Para la búsqueda de estos eventos, en la sección de parámetros opcionales de consulta, se seleccionó la opción “GUTE” en el campo de autor de la magnitud.

#### 3.1.1.9 PAS – California Institute of Technology

Este catálogo hace parte del catálogo integrado del sur de California (Hutton et ál., 2010), y es registrado por el instituto de tecnología de California (Caltech) con sede en Pasadena. Este catálogo comenzó con un total de 7 estaciones en 1932 con sismómetros de tipo Wood-Anderson o Benioff y generalmente se priorizaba el registro obtenido en la estación de Pasadena (PAS) para las localizaciones. Desde los años 70’s, Caltech comenzó una colaboración con el USGS para constituir la red sismológica del sur de California (SCSN). Los eventos de este catálogo se obtuvieron a través del sitio de consulta del ISC (ISC, s/f c).

#### 3.1.1.10 SGC - Servicio Geológico Colombiano

La red sismológica del SGC inició su operación en junio de 1993 calculando inicialmente magnitud local (Ml) y a partir de 2010 se inició el cálculo de magnitudes de momento (Mw). Para este catálogo se definió una zona de confiabilidad dentro de la cual las soluciones se consideran de mayor calidad. Las soluciones obtenidas fuera de dicha zona se consideran de alta incertidumbre, razón por la cual tales soluciones se usan únicamente en caso de que no existan reportes de mejor calidad en otras agencias globales o nacionales.

La zona de confiabilidad se determinó utilizando el promedio de las envolventes de los valores máximos aceptables para los parámetros de error en la localización en latitud, longitud y profundidad, además de los límites de los ángulos de mayores aberturas azimutales entre estaciones (GAP). Estos límites se establecieron en 15 km para el error en la localización (latitud, longitud y profundidad, Figura 8) y en 160° para el GAP (Figura 9). Asimismo, para la definición final del polígono de la zona de confiabilidad se tuvo en cuenta la sismicidad instrumental registrada por el SGC.

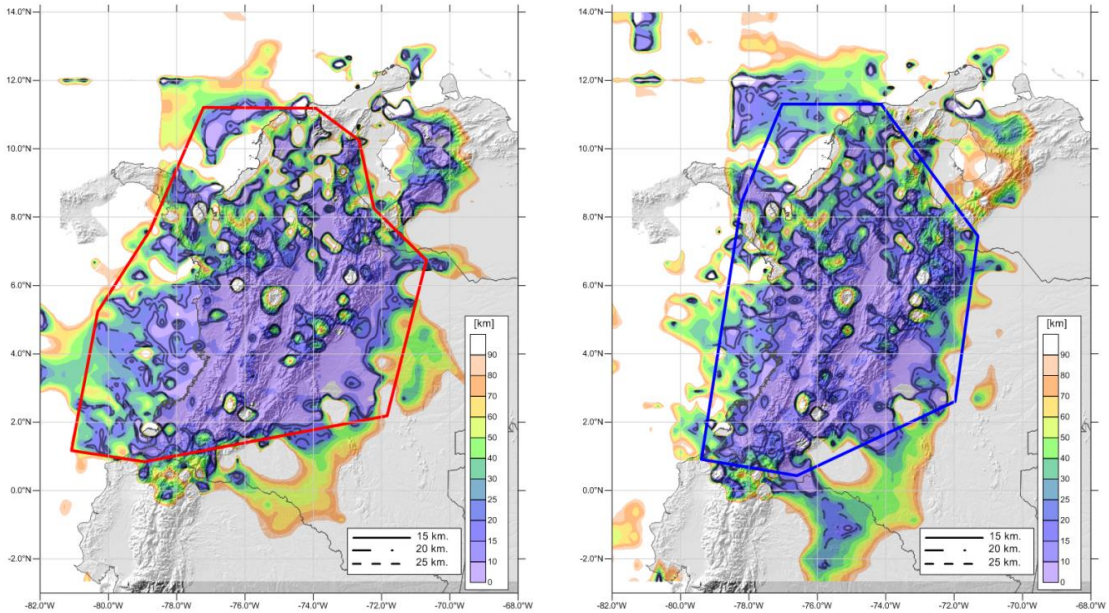



**Figura 8. Errores en latitud y longitud de los eventos reportados en el catálogo del SGC. Las líneas roja y azul corresponden a 15 km**

Fuente: autores

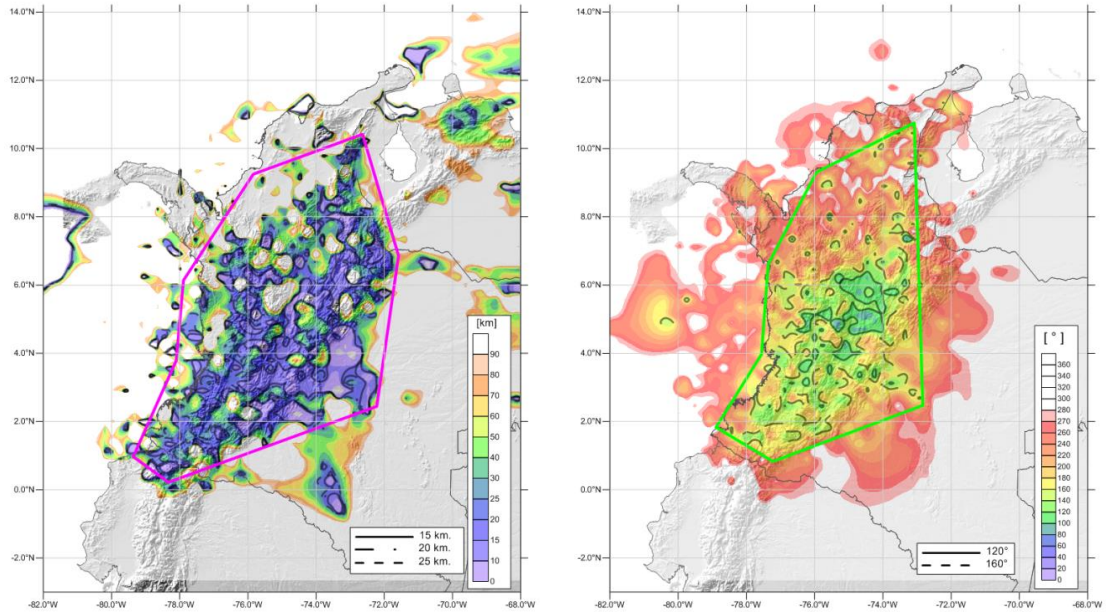



**Figura 9. Errores en Profundidad (izquierda) y GAP (derecha) de los eventos reportados en el catálogo del SGC. La línea morada corresponde a un error de 15 km y la verde a un GAP de 160°**

Fuente: autores

Los eventos localizados dentro del área de confiabilidad se incluyeron en el catálogo “SGCi” y aquellos fuera de dicha área en el catálogo “SGCo”. La Figura 10 presenta los límites de las zonas de confiabilidad establecidas.

Por otro lado, el SGC estudia la sismicidad histórica ocurrida en la región a partir de información macrosísmica. Estos estudios, además de algunos tomados del estudio de sismicidad histórica de la fundación GEM (Albini et ál., 2013), aportan información sísmica al catálogo integrado a partir de 1610 hasta 1953 (SGC-H) y se reportan magnitudes Mw con un total de 42 sismos.

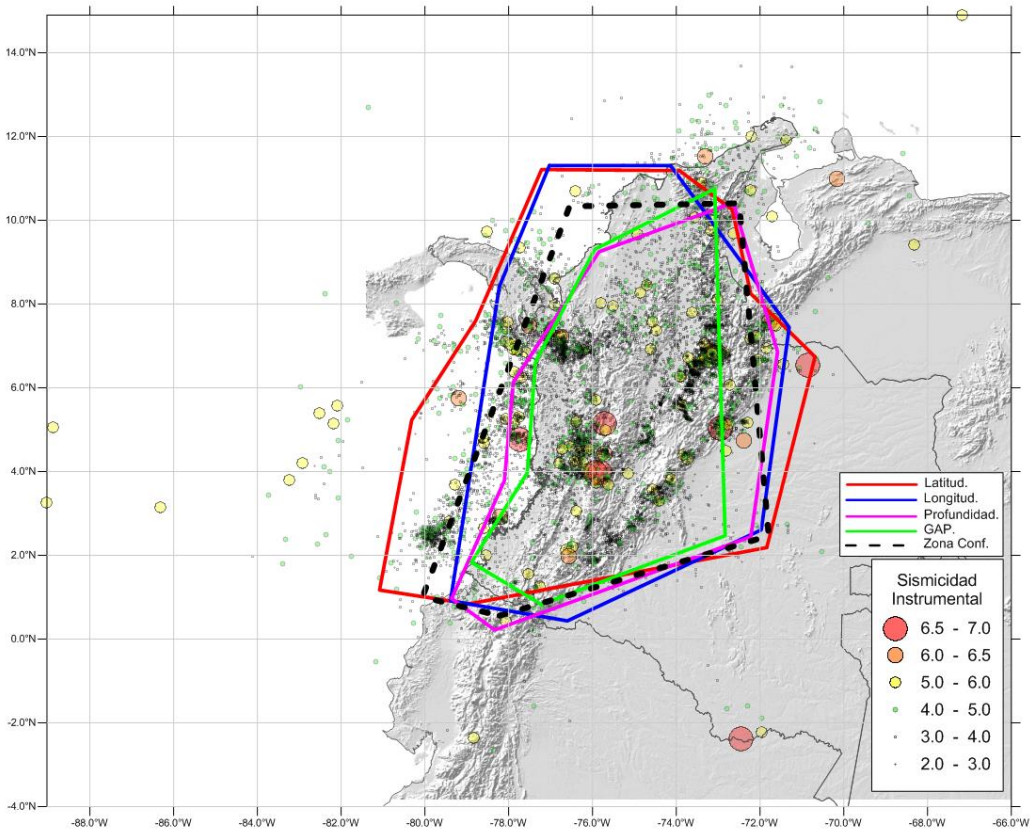



**Figura 10. Zona de confiabilidad del catálogo del SGC correspondiente al promedio de los límites de los errores en latitud, longitud, profundidad y GAP**

Fuente: autores

El catálogo de eventos registrados por la red sismológica del Servicio Geológico Colombiano se encuentra disponible al público y puede ser consultado a través del portal web institucional, en la sección denominada “Aplicaciones Sismos” (SGC, s/f).

#### 3.1.1.11 IGEPN - Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador

Este catálogo corresponde a una integración de información generada por diferentes agencias a nivel mundial, siguiendo un orden de priorización para la definición de la localización y de la magnitud de los sismos (Beauval et ál., 2013). El catálogo IGEPN contiene eventos ocurridos a partir de 1995 de magnitudes mayores e iguales a 2.7 tipo Md, las cuales son generadas por el IGEPN.

Este catálogo puede obtenerse realizando una consulta a través de la página del IGEPN, en la sección denominada "Descarga de Datos" (IGEPN, s/f). Para el presente estudio se utilizó el conjunto de datos correspondiente al "Catálogo Sísmico Homogeneizado hasta el 2009".

#### 3.1.1.12 CASC - Centro Sismológico de América Central

El Centro Sismológico de América Central (CASC por sus siglas en inglés) comenzó a operar en 1992. Hacen parte de este centro los siguientes países e instituciones: Guatemala (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología - INSIVUMEH), El Salvador (Servicio Nacional de Estudios Territoriales - SNET), Honduras (Universidad Nacional Autónoma De Honduras - UNAH), Nicaragua (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales - INETER), Costa Rica (Red Sismológica Nacional – RSN; Instituto Costarricense de Electricidad - ICE, Observatorio Vulcanológico y Sismológico De Costa Rica - OVSICORI) y Panamá (Universidad de Panamá - UPA). Cada institución aporta información de eventos sísmicos los cuales son compilados y reportados al ISC. La base de datos del catálogo del CASC consta de 28,159 eventos con magnitudes mb y Mw (Alvarenga et ál., 1998), de los cuales 751 se encuentran en el área de estudio.

### 3.1.2 Integración de los catálogos seleccionados

El principal objetivo de la integración de catálogos es obtener una base de datos de sismos homogénea, en la cual se encuentre una única descripción para cada evento. El proceso de comparación y unificación de catálogos intenta resolver las siguientes particularidades:

- *Periodos de información*: El periodo de información reportada por una agencia o contenido en un catálogo no es el mismo para todos.
- *Calidad de la información y variación temporal de la cobertura*: la cobertura de estaciones de las agencias en la zona de análisis no es la misma y varía con el tiempo; la calidad de la información varía entre catálogos dependiendo de la

cobertura de estaciones y del tipo de procedimiento utilizado para analizar la información registrada.

- *Procesamiento y compilación de datos de los catálogos seleccionados*: para la unificación de catálogos es necesario distinguir entre datos generados directamente por una agencia, o datos generados a partir de compilación de información de varias fuentes. A su vez, es posible que los datos de un mismo sismo provengan de diferentes catálogos. Por ejemplo, la información de la solución hipocentral puede provenir de una agencia, mientras que los datos de su magnitud pueden provenir de otra.

Para abordar estos puntos, se estableció un conjunto de criterios de priorización que facilita la integración de la información de los catálogos sísmicos. Tales criterios permiten elegir qué información es preferida de un catálogo frente a otro, en el caso de que dos o más catálogos ofrezcan una solución para un mismo evento. En las siguientes secciones se describen los criterios de priorización adoptados.

#### 3.1.2.1 Criterios generales de priorización

De la Tabla 3 a la Tabla 5 se presentan los criterios adoptados para priorizar la calidad de la información registrada en los catálogos utilizados, en cuanto a localización, magnitud y tipo de magnitud, respectivamente. En estas tablas, la prioridad expresa el orden en el cual deben escogerse los catálogos (entre menor sea el valor, mayor prioridad).

**Tabla 3. Criterios de priorización para la localización de los sismos**

| Prioridad | Descripción |
|---|---|
| 1 | La agencia/catálogo reporta su propia localización/relocalización con metodologías mejoradas, para todo el periodo del catálogo integrado. |
| 2 | La agencia/catálogo reporta su propia localización/relocalización con metodologías mejoradas, para un periodo específico del catálogo. |
| 3 | La agencia/catálogo reporta localizaciones de otras agencias con metodologías reconocidas. |

Fuente: autores

**Tabla 4. Criterios de priorización para la magnitud de los sismos**

| Prioridad | Descripción |
|---|---|
| 1 | La agencia reporta su propio cálculo/recálculo con metodologías conocidas para todo el periodo del catálogo integrado. |
| 2 | La agencia reporta un recálculo de magnitud con metodologías conocidas para todo el periodo del catálogo integrado. |
| 3 | La agencia reporta una aproximación de la magnitud con un proxy reconocido para todo el periodo del catálogo integrado. |
| 4 | Que se cumplan las anteriores, para periodos específicos del catálogo. |
| 5 | La agencia reporta magnitudes de otras agencias con metodologías reconocidas. |

Fuente: autores

**Tabla 5. Criterios de priorización según el tipo de magnitud**

| Prioridad | Descripción |
|---|---|
| 1 | Magnitud de Momento, Mw. |
| 2 | Magnitud de ondas de superficie, Ms y MS |
| 3 | Magnitud de ondas de cuerpo, mb. |
| 4 | Magnitud local, Ml. |
| 5 | Otras, de las cuales se conozca un proxy reconocido para Mw. |

Fuente: autores

### 3.1.2.2 Matrices de priorización

A partir de los anteriores criterios se definieron matrices de priorización para localización considerando diferentes periodos y rangos de magnitudes para cada una de las agencias o catálogos seleccionados.

En la Tabla 6, se presenta la matriz de priorización para localización. Al respecto, se señala que las agencias IGEPN, CASC y SGC únicamente aportan al catálogo a partir de los años 90. Por su parte, el aporte del catálogo IDC se aprecia desde comienzos de los 2000. Cada uno de los periodos obedece a un hito o hecho histórico que afecta la capacidad de registro y análisis de la información sísmica.

**Tabla 6 Matriz de prioridad para localización para cada uno de los catálogos seleccionados**

| Fuente | Prioridad |
|---|---|
| SGCi | 1 |
| ISC-GEM | 2 |
| EHB | 3 |
| CENT | 4 |
| ISC-REV | 5 |
| IDC | 6 |
| GUTE | 7 |
| NEIC | 8 |
| ISC | 9 |
| IGEPN | 10 |
| CASC | 11 |
| SGCo | 12 |

Fuente: autores

La Tabla 7 presenta la matriz de priorización por magnitud para cada uno de los catálogos seleccionados de acuerdo con los criterios adoptados. Las matrices presentadas en la Tabla 6 y en la Tabla 7 permiten identificar y seleccionar una solución preferida en los casos en los que existan más de una solución para un mismo evento. A partir de estas matrices, es posible identificar y remover eventos repetidos de catálogos o fuentes de información de menor prioridad.

**Tabla 7. Matriz de priorización por magnitud para cada uno de los catálogos seleccionados**

| *Agencia* | *Mw* | *ml* | *me* | *MS* | *Ms* | *ms* | *mb* | *mB* | *Mb* | *Ml* | *Md* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***GCMT*** | 1 | | | | | | | | | | |
| ***ISC-GEM*** | 2 | | | | | | | | | | |
| ***CENT*** | 3 | | | | 7 | | | 15 | | | |
| ***NEIC*** | 4 | | 5 | | 11 | 10 | 17 | | 18 | | |
| ***ISC-REV*** | | | | 6 | | | 13 | | | | |
| ***PAS*** | | | | 8 | | | | | | | |
| ***EHB*** | | | | | 9 | | | | 16 | | |
| ***SGCi*** | 12 | | | | | | | | | 19 | |
| ***IDC*** | | | | | | | 14 | | | | |
| ***IGEPN*** | | | | | | | | | | | 20 |
| ***CASC*** | 21 | | | | | | 22 | | | | |
| ***SGCo*** | 23 | | | | | | | | | 24 | |

Fuente: autores

Además de las matrices de prioridad, se señala que para la construcción del CSI se dio prioridad a las soluciones de los eventos sísmicos provenientes del catálogo SGC-H.

La Tabla 8 y la Figura 11 presentan el número y porcentaje de eventos aportados según agencia y criterios de localización y magnitud. En esta Figura se puede observar que la mayor cantidad de soluciones utilizadas son tomadas del SGC, seguido por el ISC-REV, mientras que las agencias que menos aportan son CENT y GUTE.

**Tabla 8. Números de eventos aportados por agencia luego de la priorización**

| Agencia | # Localización | # Magnitud |
|---|---|---|
| ***CASC*** | 446 | 455 |
| ***CENT*** | 3 | 9 |
| ***EHB*** | 1411 | 27 |
| ***GCMT*** | 0 | 701 |
| ***IDC*** | 205 | 179 |
| ***IGEPN*** | 3113 | 3635 |
| ***ISC-GEM*** | 532 | 297 |
| ***ISC-REV*** | 5693 | 7532 |

| Agencia | | # Localización | # Magnitud |
|---|---|---|---|
| ***NEIC*** | | 391 | 691 |
| ***PAS*** | | 0 | 25 |
| ***SGC*** | ***SGC-H*** | 40 | 40 |
| | ***SGCi*** | 19376 | 19376 |
| | ***SGCo*** | 1714 | 1714 |
| ***GUTE*** | | 25 | 0 |

Fuente: autores

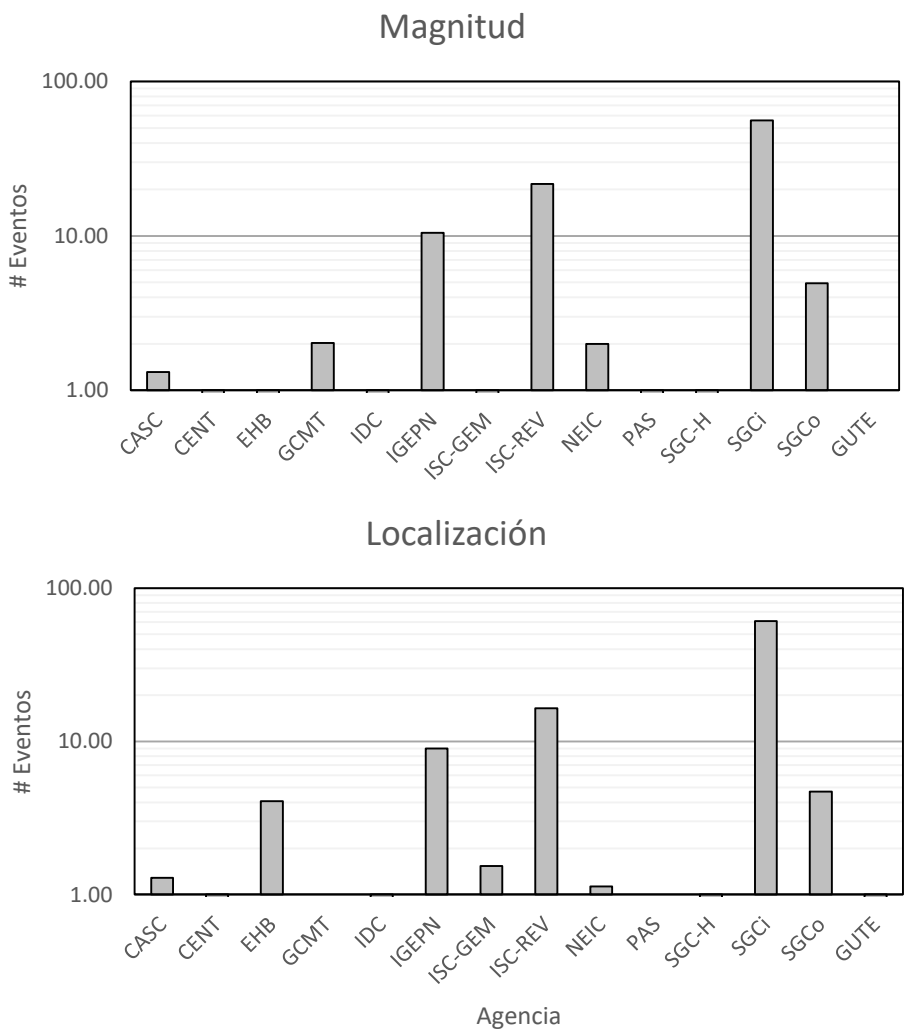



**Figura 11. Participación por agencia en términos de magnitud y localización de los eventos**

Fuente: autores

La Figura 12 presenta las soluciones preferidas de acuerdo con los criterios de priorización adoptados para la selección de la localización. De esta figura se observa la relevancia de los catálogos ISC-REV, ISC-GEM, EHB y NEIC en términos del número de eventos. Asimismo, se resaltan los aportes de los catálogos ISC-GEM, GUTE y SGC (históricos), en cuanto a la magnitud de los sismos.

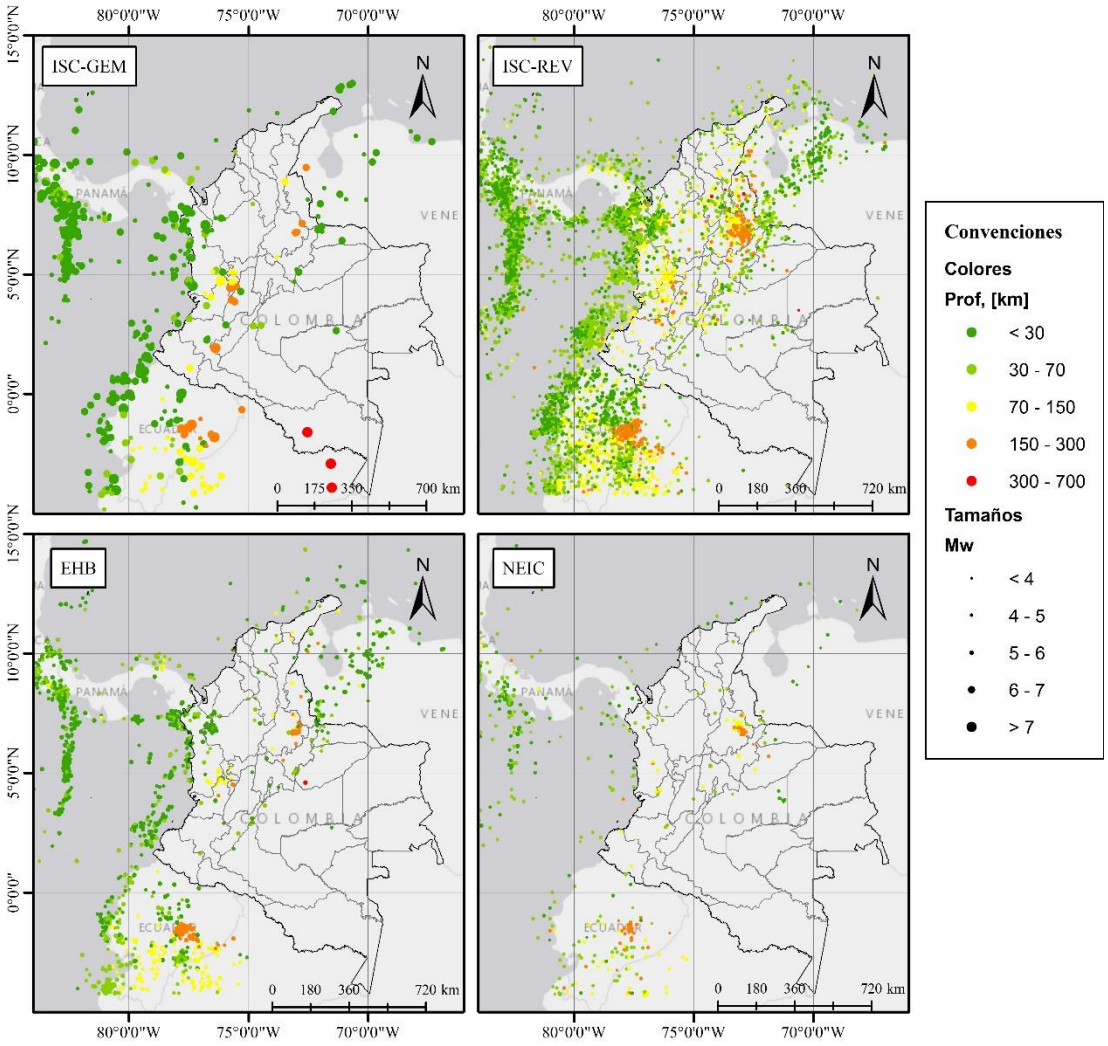



**Figura 12. Soluciones preferidas de los catálogos consultados**

Fuente: autores

En la Figura 12 también se puede encontrar la importancia de los catálogos ISC-REV y EHB para modelar la sismicidad en el pacífico colombiano y en el nido sísmico de Bucaramanga. A su vez, se considera que el catálogo SGCi puede tener una mayor influencia en la definición de la sismicidad cortical.

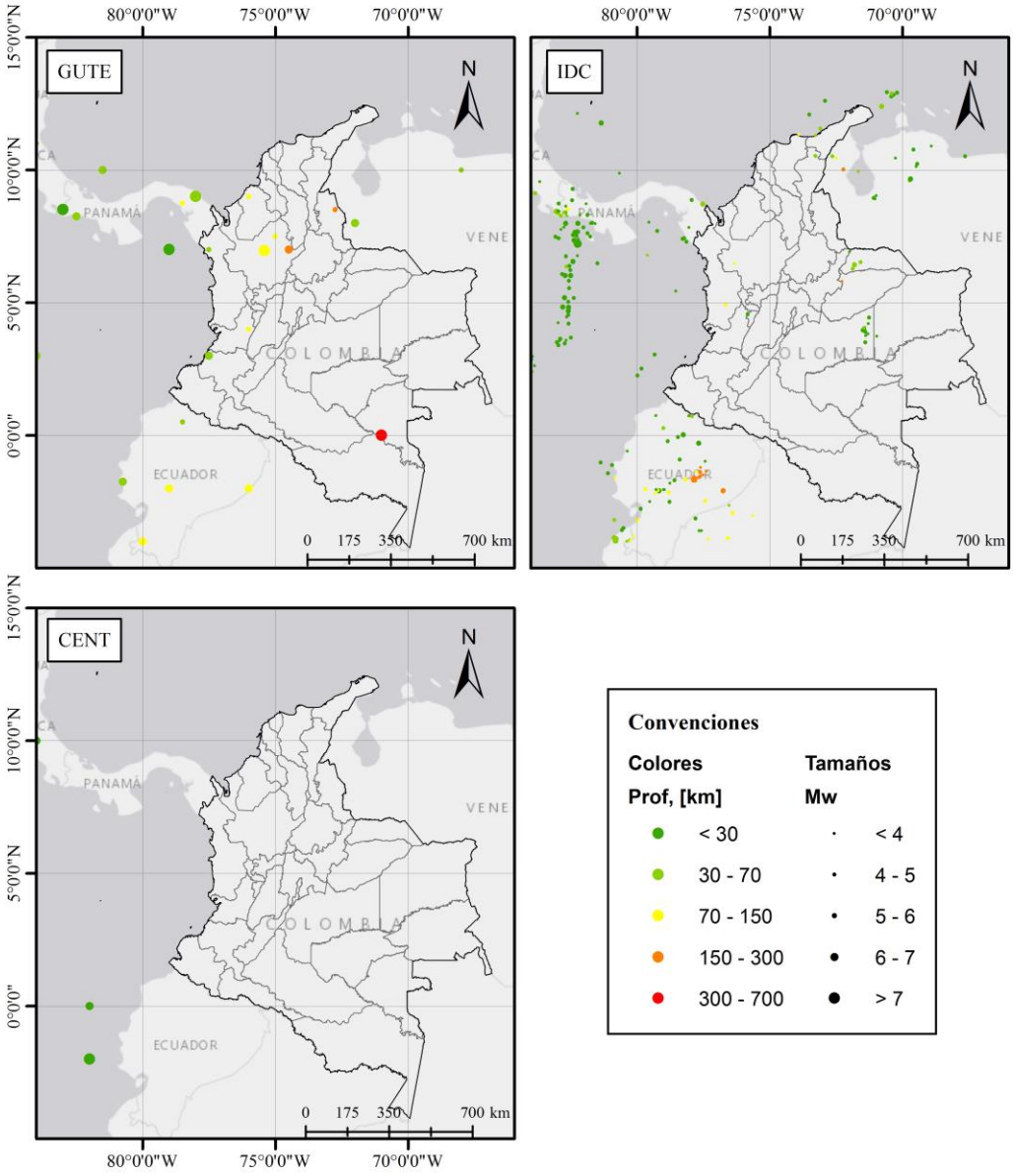



**Figura 12. (Continuación) Soluciones preferidas de los catálogos consultados**

Fuente: autores

Sobre los resultados de la Figura 12 vale la pena resaltar que el catálogo GCMT es una fuente prioritaria para la definición de la magnitud Mw de los sismos. Por otro lado, la localización de los eventos se define según las prioridades presentadas en la Tabla 6. Por esta razón, en esta figura no se encuentra la distribución geográfica de sismos priorizados del catálogo GCMT.

En cuanto a la distribución geográfica de los sismos, en la Figura 13 se puede observar la contribución de catálogos de tipo regional y local fuera de Colombia, tales como los catálogos CASC del IGEPN.

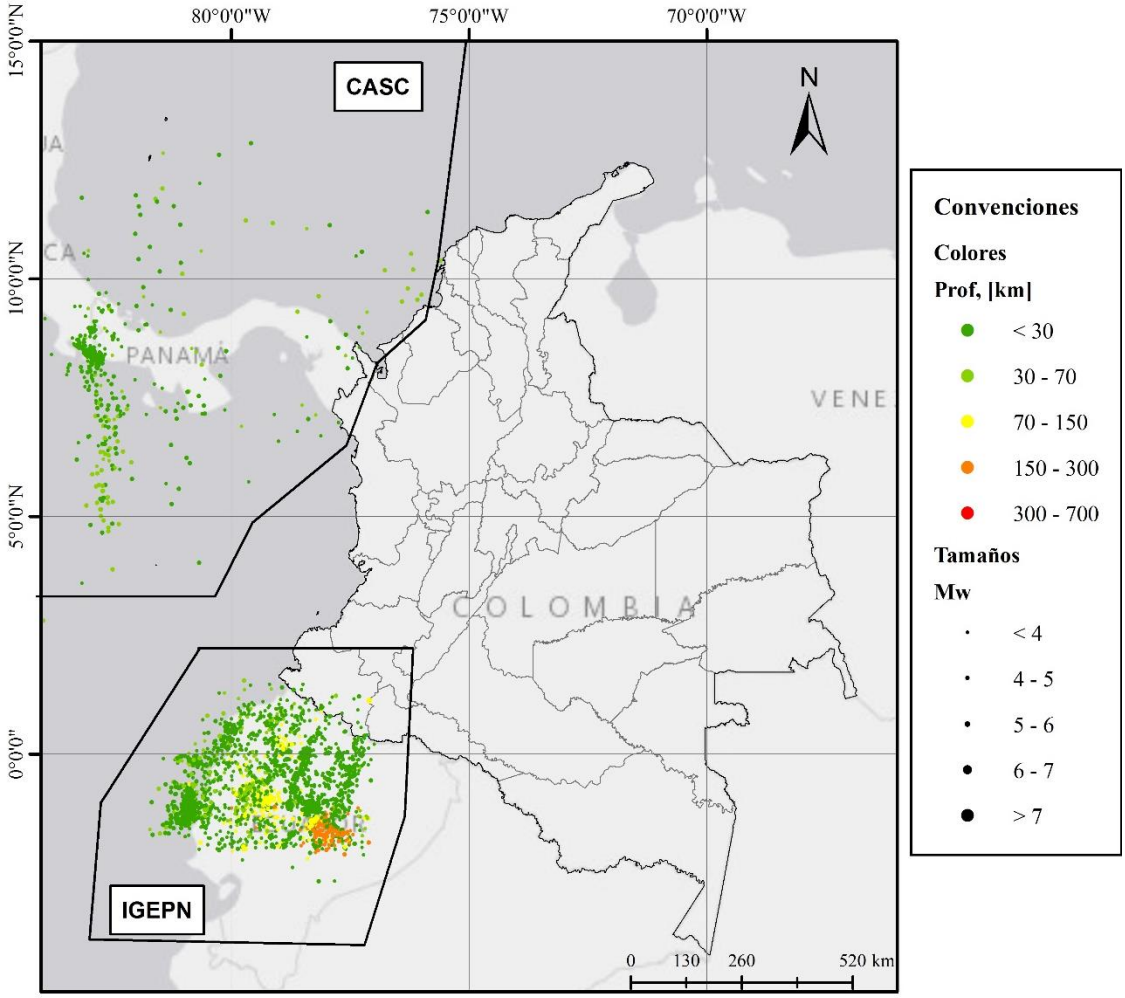



**Figura 13. Soluciones preferidas de los catálogos regionales consultados.**

Fuente: autores

La Figura 14 presenta la distribución geográfica de los sismos aportados por el SGC (en términos de localización). En esta figura se puede observar que el mayor número de eventos corresponden al catálogo SGCi, seguido del SGCo y finalmente del SGC-H. Sin embargo, cabe resaltar la importancia del aporte de los sismos históricos debido a que todos los eventos tienen valores de Mw mayores a 5.

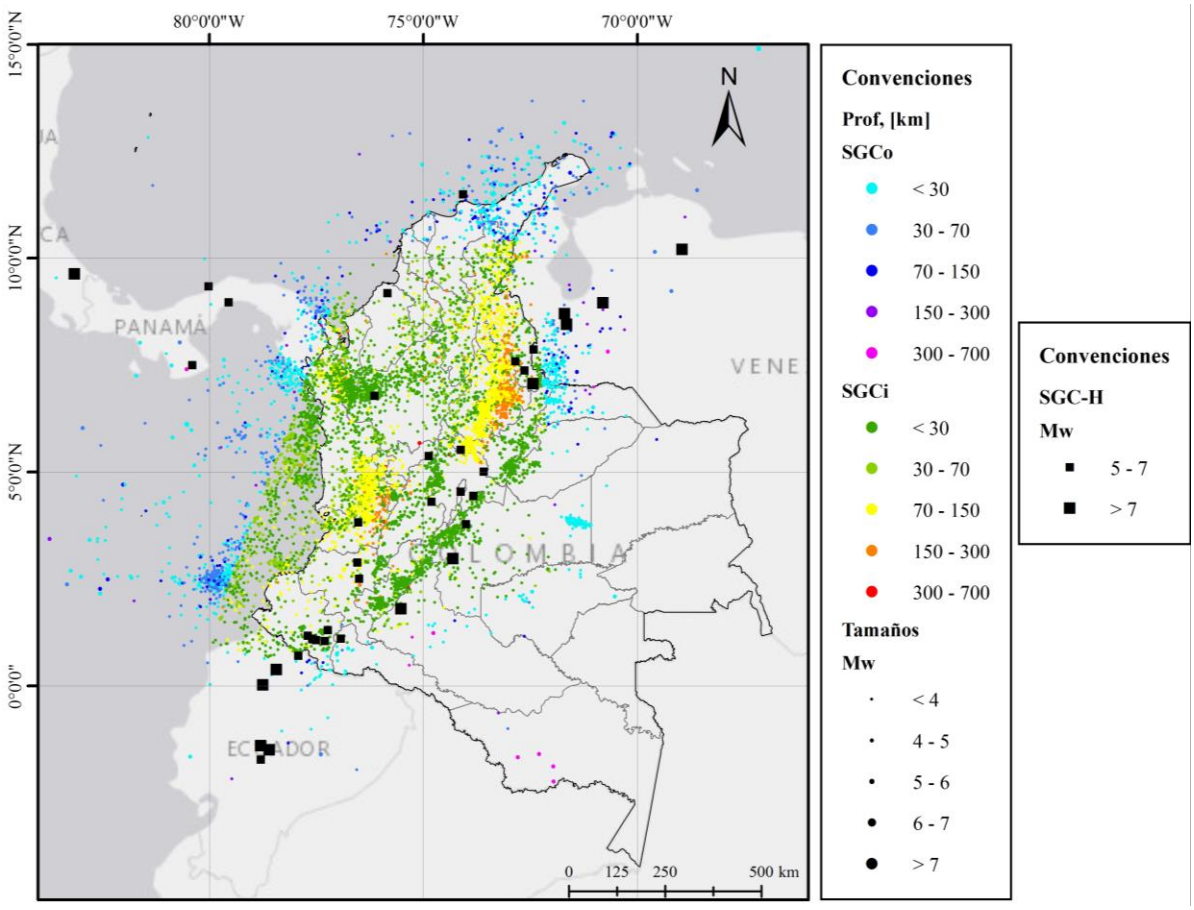



**Figura 14. Soluciones preferidas del catálogo del Servicio Geológico Colombiano**

Fuente: autores

### 3.1.3 Homogeneización de magnitudes

Los diferentes tipos de magnitudes reportadas por los catálogos seleccionados se homogenizaron a Mw. Esta homogenización obedece principalmente a que las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPE, por sus siglas en inglés) usadas para la estimación de la amenaza sísmica están en función de Mw. Además, la magnitud de momento refleja más adecuadamente las características de la fuente sísmica y es más estable para un rango de valores de magnitud más amplio.

Se plantearon diferentes alternativas de relaciones globales desarrolladas por varios autores relacionando Mw con otro tipo de magnitud como las presentadas en Di Giacomo et ál. (2014); Bondar & Storchak (2011); Bormann et ál. (2009), entre otros.

Sin embargo, estas relaciones presentan una gran variación en los parámetros obtenidos. Tal variación se debe, entre otros factores, al tipo de relación calculada, al número de eventos, la fuente de información usada y el rango de validez de las mismas. De esta manera es posible obtener una marcada sub o sobrestimación de magnitudes según el caso.

Con el fin de evitar la subjetividad en la selección de una u otra relación entre magnitudes, o bien el uso de diferentes relaciones para una misma magnitud, se calcularon relaciones usando valores de Mw estimados a partir de Mo (reportado por el GCMT por medio del tensor de momento). A su vez, se consideraron los valores de mb y Ms estimados por el NEIC y presentados por el GCMT para los mismos eventos que cuentan con magnitud Mw.

Debido a la distribución de los datos, se usaron relaciones exponenciales y bilineales (Scordillis, 2006), las cuales presentan un ajuste adecuado. Se utilizó información entre 1976 y 2015, para un total de 37,849 eventos para mb y 21,070 eventos para Ms.

Finalmente, las relaciones bilineales fueron adoptadas frente a las exponenciales debido a su mejor ajuste para la población de datos, especialmente para magnitudes mayores a 6.0.

A continuación, se presentan las relaciones desarrolladas para Mw – mb, Mw – Ms y Mw – Ml. Para el catálogo del IGEPN se usó la relación entre Mw – Md desarrollada por sus autores (Beauval et ál., 2013). Teniendo en cuenta los criterios y matrices de priorización adoptados según magnitudes, no se consideró necesario utilizar relaciones con otro tipo de magnitudes.

#### 3.1.3.1 Relación entre Mw (GCMT) y mb (NEIC – GCMT)

La Tabla 9 presenta los parámetros obtenidos para el cálculo de magnitudes Mw a partir de magnitudes mb. En la Figura 15 se presentan los datos observados y las relaciones obtenidas.

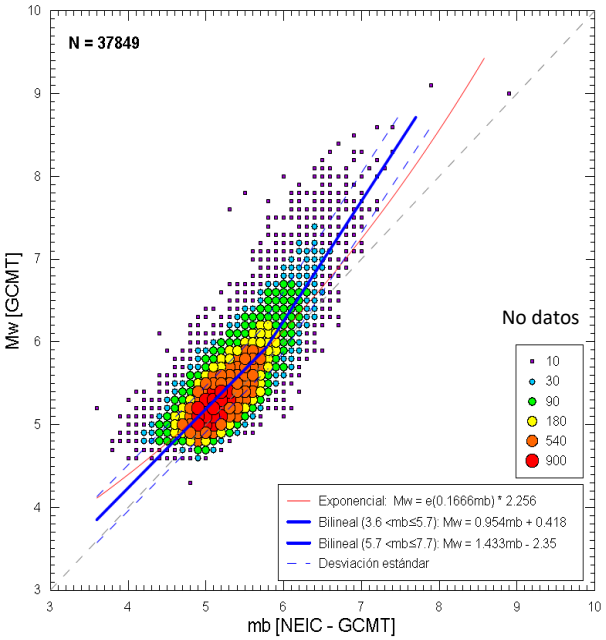



**Figura 15. Relación entre magnitudes Mw (GCMT) y mb (NEIC –GCMT) para 37849 eventos**

Fuente: autores

**Tabla 9. Relaciones obtenidas entre magnitud Mw (GCMT) y mb (NEIC –GCMT)**

| Relación | rms | $R^2$ | σ |
|---|---|---|---|
| **Mw** (3.6 < mb ≤ 5.7) = **0.954mb + 0.42** | 0.08 | 0.64 | 0.28 |
| **Mw** (5.7 < mb ≤ 7.7) = **1.433 mb -2.35** | 0.13 | 0.5 | 0.36 |

Fuente: autores

### 3.1.3.2 Relación entre Mw (GCMT) y Ms (NEIC – GCMT)

La Tabla 10 presenta los parámetros obtenidos para el cálculo de magnitudes Mw a partir de magnitudes Ms. En la Figura 16 se presentan los datos observados y las relaciones obtenidas.

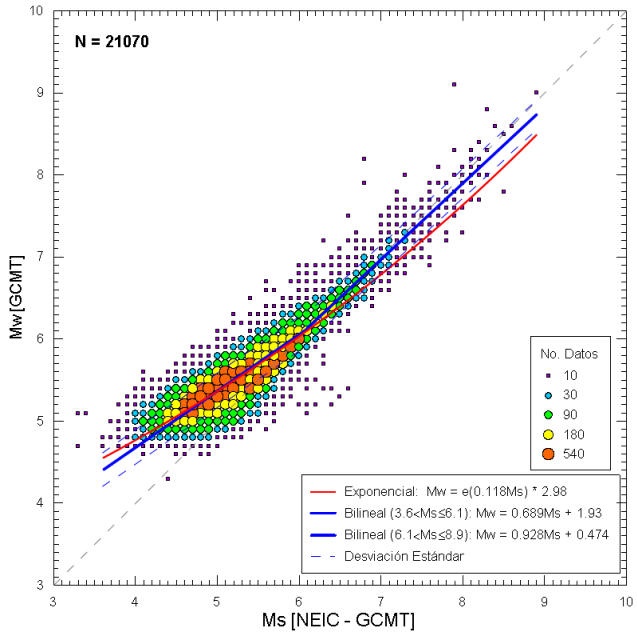



**Figura 16. Relación entre magnitudes Mw (GCMT) y Ms (NEIC –GCMT) para 21070 eventos**

Fuente: autores

**Tabla 10. Relaciones obtenidas entre magnitudes Mw (GCMT) y ms (NEIC –GCMT)**

| Relación | rms | $R^2$ | $\sigma$ |
|---|---|---|---|
| **Mw** (3.6 < Ms ≤ 6.1) **= 0.689Ms + 1.93** | 0.04 | 0.83 | 0.20 |
| **Mw** (6.1 < Ms ≤ 8.9) **= 0.928Ms + 0.474** | 0.03 | 0.84 | 0.18 |

Fuente: autores

### 3.1.3.3 Relación entre Mw (GCMT) y Ml (SGC)

En el presente estudio se considera que no existe información suficiente para una relación estadísticamente robusta entre eventos reportados con Mw por agencias globales y magnitudes Ml calculadas por el SGC. Ante esta limitación se llevó a cabo la siguiente aproximación: se estimó primero una relación entre mb (ISC) y Ml (SGC); Posteriormente, se usó la relación estimada entre mb y Mw. Detalles de la relación obtenida se encuentran en la Tabla 11 y en la Figura 16.

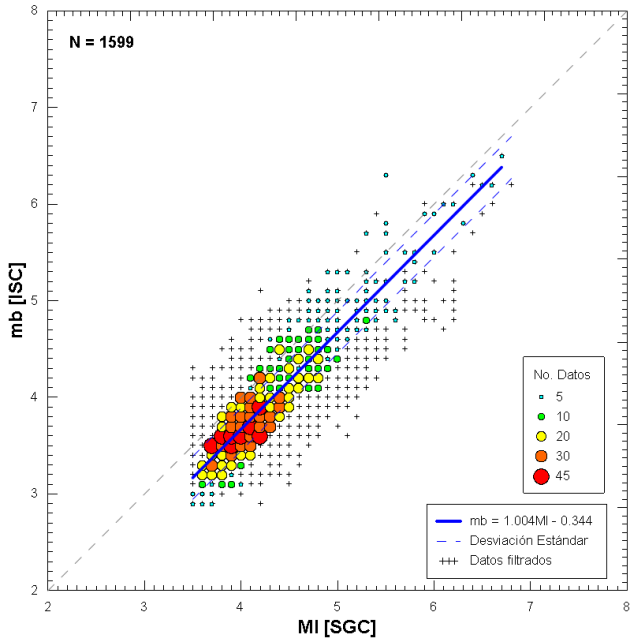



**Figura 17. Relación entre mb (ISC) y Ml (SGC) para 1599 eventos**

Fuente: autores

**Tabla 11. Relaciones entre magnitudes Mb (ISC) y Ml (SGC)**

| Relación | rms | $R^2$ | $\sigma$ |
|---|---|---|---|
| **mb[$Ml_{SGC}$]** (2.9 < Ml ≤ 6.1) **= 1.0044Ml – 0.344** | 0.05 | 0.81 | 0.22 |

Fuente: autores

Reemplazando estos resultados en la relación obtenida entre Mw y mb (ver Tabla 9), para el rango válido de datos del SGC, se obtiene la siguiente relación:

**Mw** (2.9 < Ml ≤ 6.1) **= 0.958Ml + 0.1** ($\sigma$ = 0.50)

#### 3.1.3.4 Relación entre Mw (GCMT) y Md (IGEPN)

La siguiente expresión corresponde a la relación entre magnitudes Mw (GCMT) y Md (IGEPN). Esta relación es válida para todo el rango de valores de magnitudes contenidas en el catálogo del IGEPN desarrollada por Beauval et ál. (2013).

$$\mathbf{Mw = 0.93\ (MD, Md, D) + 0.6}\ (\sigma = 0.3)$$

### 3.1.4 Catálogo Sísmico Integrado

El Catálogo Sísmico Integrado resulta de la identificación de la solución preferida para cada evento de acuerdo con las matrices de priorización por localización y magnitud de las fuentes de información seleccionadas; la depuración de eventos duplicados y anómalos, así como la homogenización de magnitudes utilizando la magnitud Mw.

La Tabla 12 presenta características generales del CSI. La Figura 18 presenta la distribución epicentral de los eventos, los cuales cubren el área geográfica de interés para la amenaza sísmica de Colombia, comprendida entre las coordenadas -84.0° y -66.8° de longitud, y -4.8° y 14.9° de latitud.

**Tabla 12. Características generales del Catálogo Final Integrado**

| Característica | Descripción |
|---|---|
| Número de eventos | 34,681 |
| Periodo (años) | 1610 - 2014 |
| Tipo de magnitud | Mw (homogenizada) |
| Rango de magnitud | 2.9 – 8.4 |
| Rango de sigma Mw | 0.0 – 1.18 |
| Rango de profundidad (km) | 0.0 - 700 |
| Rango valores de GAP (°) | 0.0 – 360 (no disponible para algunas agencias) |
| Rango número de estaciones | 0 – 1371 (No disponible para algunas agencias) |
| Rango valor del RMS[1] | 0 – 66.5 (No disponible para algunas agencias) |

Fuente: autores

[1] RMS: error cuadrático medio de los tiempos de viaje entre estaciones

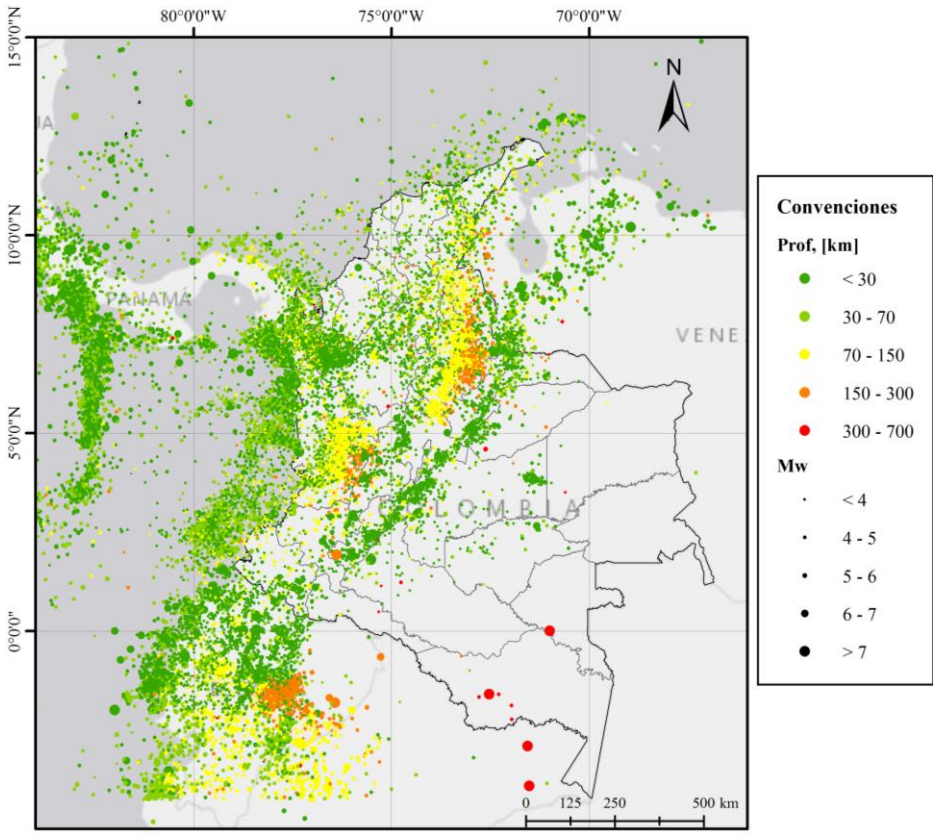



**Figura 18. Mapa de distribución de epicentros contenidos en el Catálogo Sísmico Integrado comprendido entre los años 1610 a 2014**

Fuente: autores

### 3.1.5 Remoción de eventos dependientes del Catálogo Sísmico Integrado

En el presente estudio, para la modelación de amenaza se supone que los sismos son eventos aleatorios independientes. Bajo este supuesto, la ocurrencia de un sismo no afecta la ocurrencia de otro, siendo así constante la tasa de ocurrencia de eventos; (tal tasa no varía ni depende del tiempo).

Para modelar un proceso estocástico en el cual, la tasa de ocurrencia de eventos es constante, es posible utilizar una distribución de probabilidad de Poisson. Para estimar dicha tasa de sismicidad es necesario identificar aquellos eventos dependientes (tales como premonitores, réplicas, enjambres) y aislarlos de los eventos principales o independientes. A este proceso de remover eventos dependientes que forman agrupaciones o “clusters” y que están relacionados en el tiempo y en el espacio se lo conoce como “declustering”.

Existen diferentes algoritmos para identificar eventos dependientes y remover aquellos dependientes, entre los cuales se destacan los desarrollados por Gardner y Knopoff (1974); Reasemberg (1985); AFTERAN (Musson, 1999); Zhuang (2002); Hainzl et ál.

(2006); entre otros. En el presente estudio se usó algoritmo de Gardner y Knopoff implementado en la herramienta Hazard Modeller's Toolkit (HMTK) del motor de cálculo OpenQuake (Weatherill, 2014).

Dicho algoritmo permite la identificación de eventos principales y la remoción de eventos dependientes a partir de la definición de una ventana espacio-temporal capaz de discriminar los premonitores y las réplicas a partir de la magnitud de los eventos principales y su relación (geográfica y espacial) con eventos de magnitud inferior.

Así, un evento se considera dependiente si ha ocurrido a una cierta distancia y en un intervalo de tiempo del evento principal y su magnitud es inferior a la magnitud del evento principal. Para definir estas ventanas existen diversas metodologías, tales como las descritas en Gardner y Knopoff (1974) y las aproximaciones propuestas posteriormente por Uhrhammer (1986) y Grüenthal (ver Van Stiphout et ál., 2012). La Figura 19 presenta las ventanas disponibles en la herramienta HMTK.

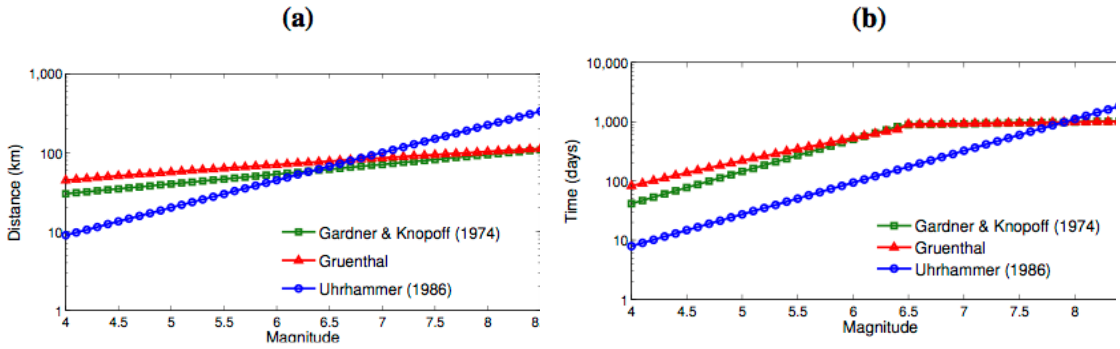



**Figura 19. Ventanas espacio-temporales implementadas en la herramienta HMTK para remover eventos dependientes siguiendo el método propuesto por Gardner y Knopoff (1974)**

Fuente: autores

La ventana temporal utilizada para identificar eventos premonitores se definió como una fracción proporcional a la ventana de las réplicas. Ventanas iguales tienen un factor igual a 1. Para ventanas de tiempo menores o mayores se debe reducir o incrementar respectivamente este parámetro. Para el declustering del CSI se utilizó un factor de 0.9.

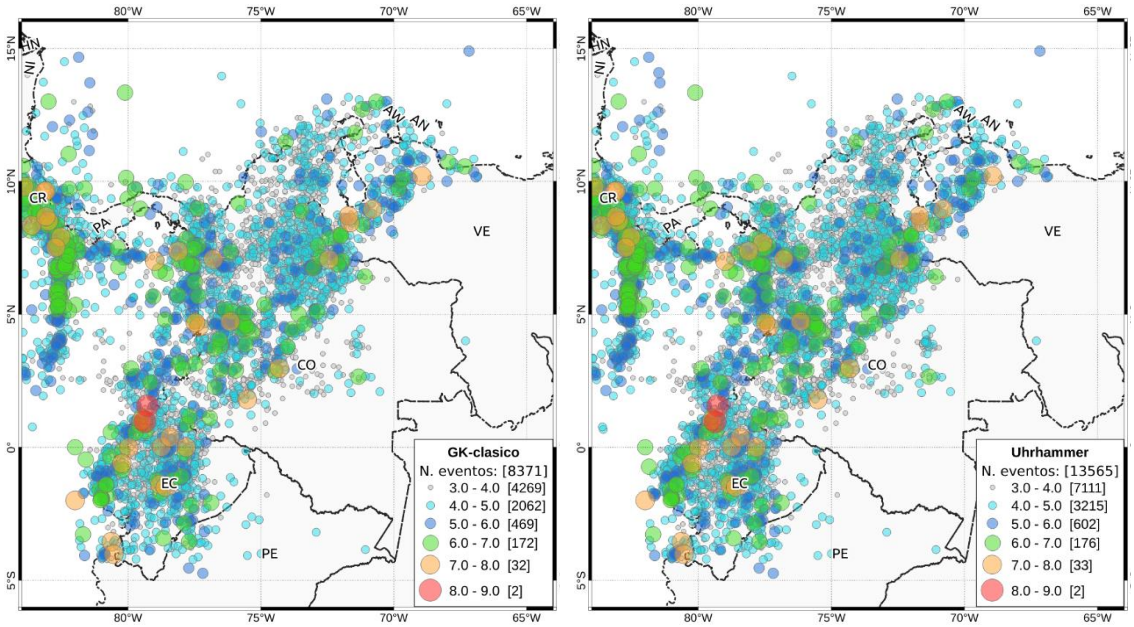
El proceso de declustering fue realizado según el ambiente tectónico predominante[2], teniendo en cuenta que la ocurrencia de sismos principales (y los dependientes) no es

[2] Una descripción de los ambientes tectónicos considerados para el modelo de amenaza sísmica de Colombia se encuentra en el capítulo 4.

exclusiva de un ambiente tectónico especifico. Por ejemplo, eventos en la zona interplaca de la subducción del pacífico pueden provocar replicas en la zona cortical.

Por esta razón, los eventos se separaron en dos grupos: a) corticales y de interplaca y b) intraplaca de profundidad intermedia. Los eventos principales identificados en estos grupos fueron posteriormente discriminados según el ambiente tectónico predominante. Los resultados obtenidos usando la aproximación propuesta por Uhrhammer (1986) se consideran apropiados teniendo en cuenta la estabilidad del parámetro ***b*** de la distribución Gutenberg-Richter y la posibilidad de utilizar un rango de magnitudes mayor.

La Figura 20 presenta los resultados de la remoción de eventos dependientes usando el método de Gardner y Knopoff con dos ventanas espacio-temporales diversas: a) clásica y b) Uhrhammer. De esta figura se resalta la diferencia en el número de eventos obtenidos en el rango de magnitudes entre 3.0 y 5.0.




a) b)

**Figura 20. Eventos principales resultado de la remoción de eventos dependientes: a) método de Gardner y Knopoff clásico y b) método de Gardner y Knopoff usando la aproximación propuesta por Uhrhammer (1986)**

Fuente: autores

La Tabla 13 presenta los eventos independientes clasificados según modelos de fuentes y ambientes tectónicos. El porcentaje de remoción o identificación de eventos dependientes usando el catálogo total es significativamente alto. Esto se debe a que un amplio porcentaje del catálogo corresponde a sismicidad intermedia principalmente de la fuente del Nido de Bucaramanga.

Para esta fuente, las características de generación de sismos en términos de magnitud, distancia y tiempo no corresponden a las relaciones clásicas de sismos principales y réplicas o premonitores.

**Tabla 13. Clasificación sismo-tectónica de la sismicidad para eventos del catálogo (sin eventos dependientes), según modelos de fuentes**

| Ambiente tectónico | N. eventos (Modelo b1) | N. eventos (Modelo b2) |
|---|---|---|
| Cortical | 9054 | 8991 |
| Interplaca | 311 | 365 |
| Intraplaca (Zona Benioff) | 760 | 790 |
| Profundos (Bucaramanga) | 3440 | 3415 |
| **Total** | **13565** | **13561** |

Fuente: autores

**Nota:** La descripción de los modelos de fuentes (b1 y b2) se presenta en el capítulo 4.

### 3.1.6 Análisis de completitud

Un catálogo sísmico es una herramienta para establecer tasas de actividad sísmica de las fuentes. Estas tasas relacionan la cantidad de eventos (según magnitudes) que pueden ocurrir en una ventana de tiempo. Al respecto, es recomendable considerar que a medida que se remonta en el tiempo es posible que se pierda o que falte información en tales catálogos.

Para los periodos más antiguos, la información proporcionada en los catálogos sísmicos es escasa o incompleta debido a factores como la ausencia de equipos de registro sísmico, la caracterización de eventos bajo criterios diferentes a las metodologías actuales, o bien la caracterización de eventos muy fuertes (de magnitud elevada), dejando por fuera a eventos de magnitudes menores.

Para periodos instrumentales, la falta de cobertura de redes sísmicas o deficiencias en los procedimientos de detección y localización de eventos, entre otras limitaciones, contribuyen a la falta de consistencia y homogeneidad de los datos.

Para los periodos más recientes, el incremento de redes globales, el mejoramiento en la calidad y sensibilidad en detección y registro de equipos sismológicos, el empleo de métodos y procedimientos de localización y estimación de magnitudes más precisos, entre otros factores, incrementan la densidad y calidad de la información de los catálogos sísmicos, mejorando por lo tanto su completitud para estos periodos.

Bajo estas consideraciones, para estimar tasas de actividad sísmica confiables se establecen períodos en los que exista cierta certeza (o que pueda admitirse) que el

registro de eventos presentes en el catálogo esta "completo" para un rango de magnitudes determinadas.

Para evaluar la completitud de un catálogo se identifica la magnitud más baja ($M_c$) para la cual se supone que el 100% de los sismos de magnitudes mayores o iguales a $m_c$ han sido registrados (Woessner & Wiemer, 2005). Dicha magnitud mínima se conoce como magnitud de completitud.

Para el cálculo de la completitud del Catálogo Sísmico Integrado se utilizó el método de Stepp (1972) el cual consiste en la identificación de intervalos de tiempo para los cuales la información del catálogo sísmico se considere completo a partir de una magnitud determinada.

Según Stepp (1972), la desviación estándar ($\sigma_\lambda$) de la tasa media de ocurrencia de sismos ($\lambda$), en un periodo de tiempo ($T$) está descrita por:

$$\sigma_\lambda = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{T}}$$

Un rango de magnitud durante un periodo de tiempo dado es completo si la variación o tendencia de $\sigma_\lambda$ es similar a la de $1/\sqrt{T}$. En caso contrario, el periodo de tiempo evaluado no es suficiente o el rango de magnitud considerado no es completo.

En la Figura 21, se muestra la variación de $\sigma_\lambda$ en el tiempo para diferentes periodos y la estimación de su magnitud de completitud (Mc) para el catálogo integrado del SGC utilizando un intervalo de magnitud $\Delta M = 0.5$. Los puntos negros corresponden a la Mc para cada periodo

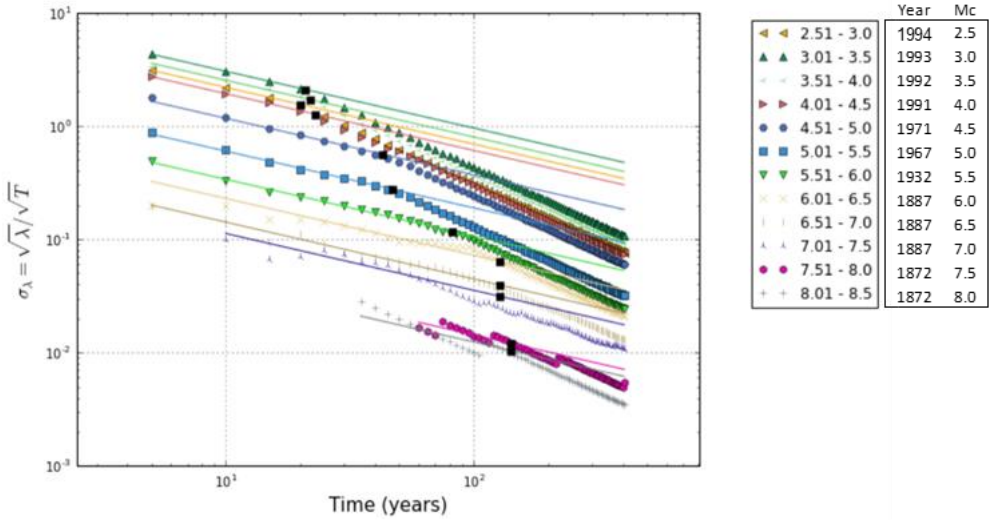



**Figura 21. Variación en el tiempo (años) de la magnitud de completitud (Mc) y su desviación estándar ($\sigma_\lambda$) usando el método de Stepp (1972)**

Fuente: autores

En la Tabla 14, se presentan periodos según rangos de magnitudes de completitud.

**Tabla 14. Rangos de completitud para el Catálogo Integrado del SGC**

| Periodo | Intervalo de magnitud (Mw) |
|---|---|
| 1994 - 2014 | 3.5 – 4.0 |
| 1971 - 1994 | 4.0 – 4.5 |
| 1964 - 1971 | 4.5 – 5.0 |
| 1932 - 1964 | 5.0 – 5.5 |
| 1887 - 1932 | 5.5 – 7.0 |
| 1872 - 7887 | 7.0 – 7.5 |
| 1610 - 1872 | ≥ 7.5 |

Fuente: autores

## 3.2 Base de datos de fallas activas

En la actualidad, es cada vez más frecuente la inclusión de un modelo de fallas activas (peligrosas) dentro del análisis de la amenaza sísmica. Esta información es particularmente relevante en regiones donde la información registrada dentro del catálogo no logra cubrir el intervalo (reconocido) de ocurrencia de grandes rupturas sísmicas asociadas a estructuras neotectónicas corticales.

La Fundación GEM ha favorecido y promovido la creación de bases de datos de fallas activas (Pagani et ál., 2015; 2016) donde se compile y ponga a disposición de la comunidad científica información relevante (al menos mínima) que pueda ser utilizada en la creación de fuentes sísmicas con esta tipología.

En el caso específico de Suramérica, las deformaciones cuaternarias son principalmente el resultado de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa suramericana a lo largo de la costa oeste en Colombia, Ecuador, Perú y Chile; así como del movimiento transcurrente dextral de la placa del Caribe con respecto a la placa de Suramérica, a lo largo de la costa norte del continente en Colombia y Venezuela.

Sismos importantes asociados a fallas, aunque menos frecuentes son conocidos y han causado daños importantes en Argentina (San Juan, 1994), Perú (Ancash, 1946), Colombia (eje cafetero, 1999) y Venezuela (Caracas, 1967).

El estudio de las deformaciones cuaternarias y su aporte a la caracterización de las fallas consideradas como sismogénicas en Sur América se inició de forma sistemática en los años 90, con los estudios realizados para el proyecto global ILP: “World map of major active faults” (Trifonov y Machette, 1993).

En el marco de este proyecto se creó un grupo de expertos regional (Grupo Suramericano de Neotectónica, GSN), el cual, a través de proyectos de colaboración científica internacional, o bien mediante esfuerzos nacionales fue enriqueciendo una base de datos regional (de parámetros neotectónicos principalmente) compilada usando

diversos criterios y metodologías (ver, por ejemplo: Audemard et ál., 2000; Egüez et ál., 2003; Paris et ál., 2000).

Esta base inicial fue posteriormente enriquecida en el marco de dos proyectos regionales: el proyecto Multinacional Andino (MAP, Getsinger y Hickson, 2000; Proyecto Multinacional Andino, 2008) y en el proyecto South America Risk Assessment (SARA) (García et ál., 2017), promovido por la Fundación GEM. En particular, el proyecto MAP contribuyó a la compilación de aproximadamente 600 estructuras neotectónicas organizadas dentro una base digital geo-referenciada, muchas de ellas nuevas o una versión revisada de la propuesta precedente. Un buen resumen del estado del conocimiento sobre esta temática a nivel continental es presentado por Costa et ál. (2006).

Por otra parte, en el marco de las actividades del proyecto SARA, fue posible revisar y mejorar la información recopilada por los expertos nacionales y homogenizar toda esta información a nivel continental (García et ál., 2017). En el proceso de revisión y homogenización de las estructuras neotectónicas, a pesar de la variabilidad y la calidad de la información, fue posible identificar estructuras prioritarias desde un punto de vista sismo tectónico, así como su posible contribución a la amenaza a nivel continental desde un punto de vista puramente geo-tectónico (ver Figura 22).

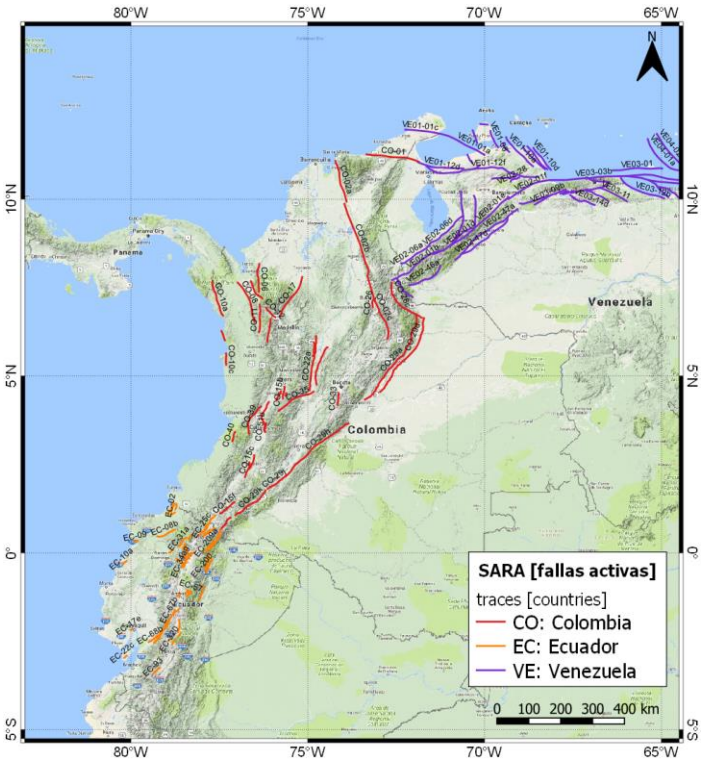



**Figura 22. Base de datos de fallas activas del proyecto SARA (v.1.0). Las estructuras han sido representadas por la traza superficial**

Fuente: autores

El SGC ha sido parte de todas las iniciativas citadas anteriormente. La compilación de las estructuras neotectónicas de Colombia dentro del GSN ha tenido como punto de partida el estudio de Paris et ál., (2000) realizado en el marco del proyecto ILP (ver Figura 23). De manera simultánea, en el SGC se creó una Base de datos de fallas activas (Montes y Sandoval, 2001). Estas compilaciones recogen información en muchos casos obtenida durante proyectos de reconocimiento regional y en pocos casos, son el resultado de trabajos de exploración hechos por especialistas neotectónicas.

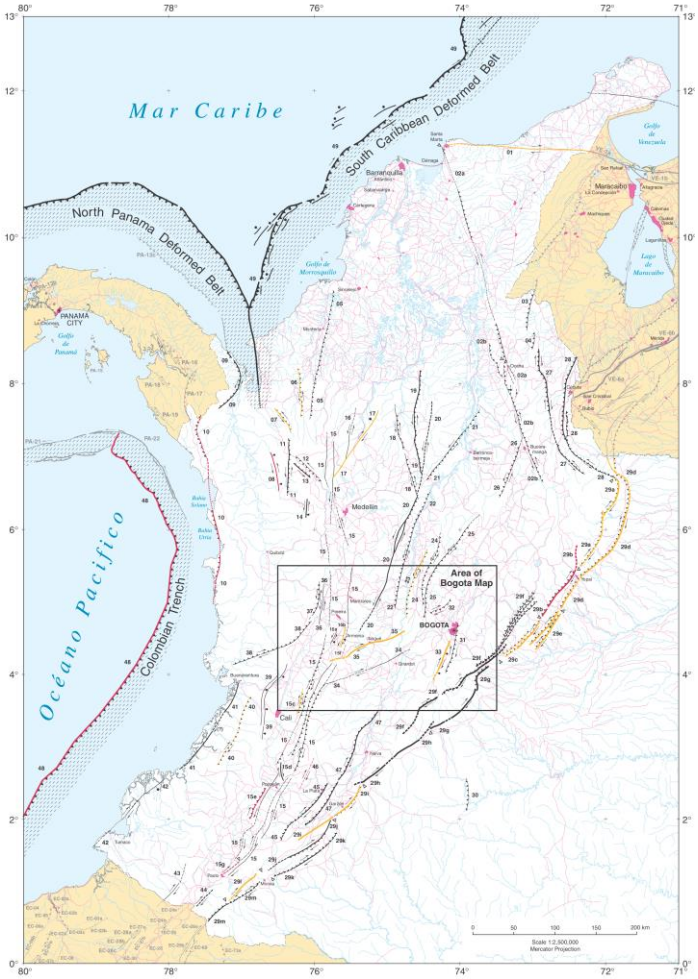



**Figura 23. Mapas de fallas cuaternarias**

Fuente: Paris et ál. (2000)

Con el fin de incluir fallas activas en el modelo de amenaza sísmica de Colombia, en el presente estudio se utilizó una versión revisada de la base de datos nacional creada en el marco del proyecto SARA. Esta base de datos contiene información sobre estructuras

neotectónicas (o fallas activas prioritarias) escogidas siguiendo 3 criterios fundamentales:

- La tasa de deformación anual (referida a la falla) es igual o mayor de 0.1 mm/año,
- Evidencia de actividad tectónica (confirmada) en el Pleistoceno tardío,
- Evidencia de actividad sísmica (confirmada o inferida) para terremotos con magnitud (Mw) mayor de 5.5.

La Figura 24 presenta la base de datos de fallas compilada para Colombia y países colindantes como Venezuela y Panamá. A su vez, la Tabla 15 presenta los parámetros (y su formato) que caracterizan cada una de las estructuras.

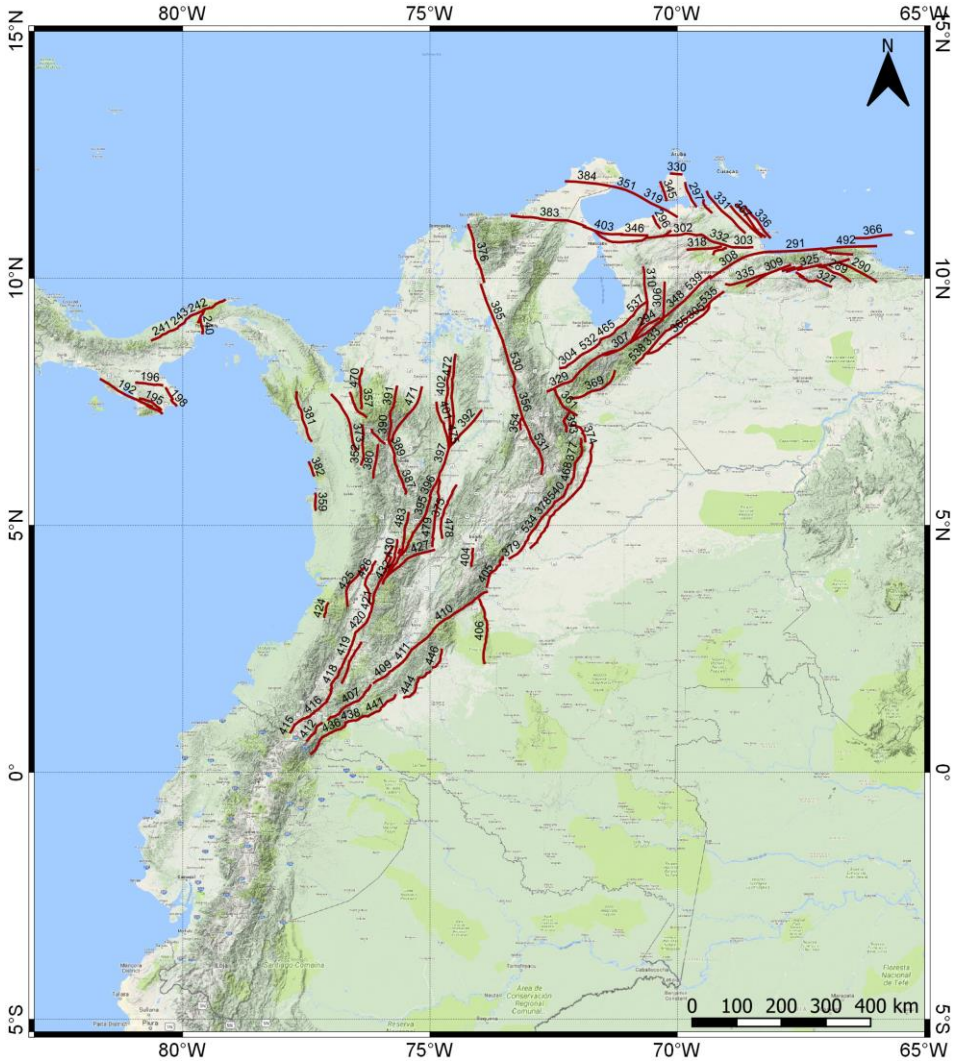



**Figura 24. Base de datos de fallas activas utilizadas en el modelo. Las estructuras han sido representadas por la traza superficial**

Fuente: autores

**Tabla 15. Estructura de la base de datos paramétrica de las fallas activas**

| | | |
|---|---|---|
| **Características generales** | | |
| **Id** | Texto | Identificador de la falla (o segmento de falla) |
| **accuracy** | Texto | Escala a la que fue cartografiada la traza |
| **is_active** | Entero | Grado de certeza de actividad cuaternaria |
| **name** | Texto | Nombre de la falla |
| **fs_name** | Texto | Nombre del Sistema de fallas (si es necesario) |
| **last_movement** | Texto | Fecha del último movimiento reconocido |
| **exposure_quality** | Entero | Cuanto visible es la traza en superficie |
| **epistemic_quality** | Entero | Grado de certeza |
| **reference** | Texto | Referencias bibliográficas |
| **notes** | Texto | Información adicional relevante |
| **Características geométricos** | | |
| **average_dip** | Tupla | Angulo de buzamiento promedio |
| **dip_dir** | Texto | Dirección del buzamiento |
| **downthrown_side_id** | Texto | Dirección del labio hundido de la falla |
| **wkt_geometry** | Texto | Geometría de la falla en formato WKT (Well-Known Text) |
| **Características geodinámicas** | | |
| **slip_type** | Texto | Tipo de movimiento cinemático predominante |
| **net_slip_rate** | Tupla | Tasa de deslizamiento anual (total) |
| **strike_slip_rate** | Tupla | Tasa de deslizamiento anual (en la dirección del rumbo) |
| **vert_slip_rate** | Tupla | Tasa de deslizamiento anual (vertical) |
| **shortening_rate** | Tupla | Tasa de deslizamiento anual (horizontal) |
| **average_rake** | Tupla | “rake” de la falla según la convención propuesta por Aki and Richards (1980) |

Fuente: autores

**Formatos**

**Tupla**: Es un trio de números (enteros o de punto flotante) que representan la incertidumbre de una variable o parámetro que caracteriza una falla (p.e. taza de deslizamiento anual). En este caso específico tiene el siguiente significado: (valor preferido, valor mínimo, valor máximo).

**Entero** Formato numérico usado para categorizar variables referidas a la incertidumbre/calidad de la información compilada (p.e. epistemic_quality: 1: alta certeza, 2: certeza moderada, 3: incierta)

**Texto**: Referido a datos tipo texto (p.e. dip_dir: N, norte geográfico)

## 3.3 Base de datos de movimientos fuertes

La base de datos de movimientos fuertes corresponde a la consolidación de un conjunto de registros acelerográficos de eventos sísmicos. Para cada evento se encuentra información suficiente para su caracterización en términos de su ubicación, magnitud y mecanismo focal. Asimismo, la base de datos de movimientos fuertes cuenta con información de las estaciones de la red acelerográfica, de tal manera que es posible caracterizar los posibles efectos sísmicos locales de cada estación, utilizando parámetros relacionados con la velocidad de onda de corte a diferentes profundidades.

La base de datos de movimientos fuertes está organizada según las regiones tectónicas identificadas en el modelo de fuentes sismogénicas del país (ver capítulo 4). Esta base de datos es útil para obtener las aceleraciones espectrales de los sismos registrados. A su vez, estos datos se utilizan para seleccionar las ecuaciones de atenuación que mejor se ajustan a las intensidades del movimiento observadas (ver capítulo 5).

### 3.3.1 Información por región tectónica

Para la descripción del catálogo de eventos, en el área de estudio se reconocen cuatro regiones tectónicas principales: corteza activa, zona de subducción (interplaca) en la costa pacífica, zona de Benioff (intraplaca), y zona del nido sísmico de Bucaramanga (intraplaca). Se usaron eventos sísmicos con mecanismo focal determinado en el catálogo del GCMT. Estas 4 zonas se definieron como: Cortical, Interplaca, Benioff y Nido, correspondientemente.

Por otro lado, la base de acelerogramas está construida a partir de los registros de la red de acelerógrafos del SGC y de los registros del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador (IGEPN, 2018; IGEPN, 2016 a) para el sismo de abril de 2016 y sus réplicas. En total se encuentran 1786 registros (tri-axiales) para 118 eventos. El ambiente tectónico para el cuál se tienen más registros es el cortical, con más de 600 acelerogramas, mientras que la zona de interface en la subducción del pacífico tiene el menor número de registros, con aproximadamente 250 (ver Tabla 16). La distribución de los acelerogramas registrados se puede observar en la Figura 25 (a).

**Tabla 16. Registros acelerográficos por ambiente tectónico**

| Ambiente Tectónico | # Registros | Profundidad Promedio, [km] | Rango Mw |
|---|---|---|---|
| Cortical | 607 | 25 | 4.8 - 7 |
| Nido | 485 | 147 | 4.8 – 6.25 |
| Benioff | 435 | 131 | 4.8 – 7.3 |
| Interplaca | 259 | 22 | 5 – 7.8 |

Fuente: autores

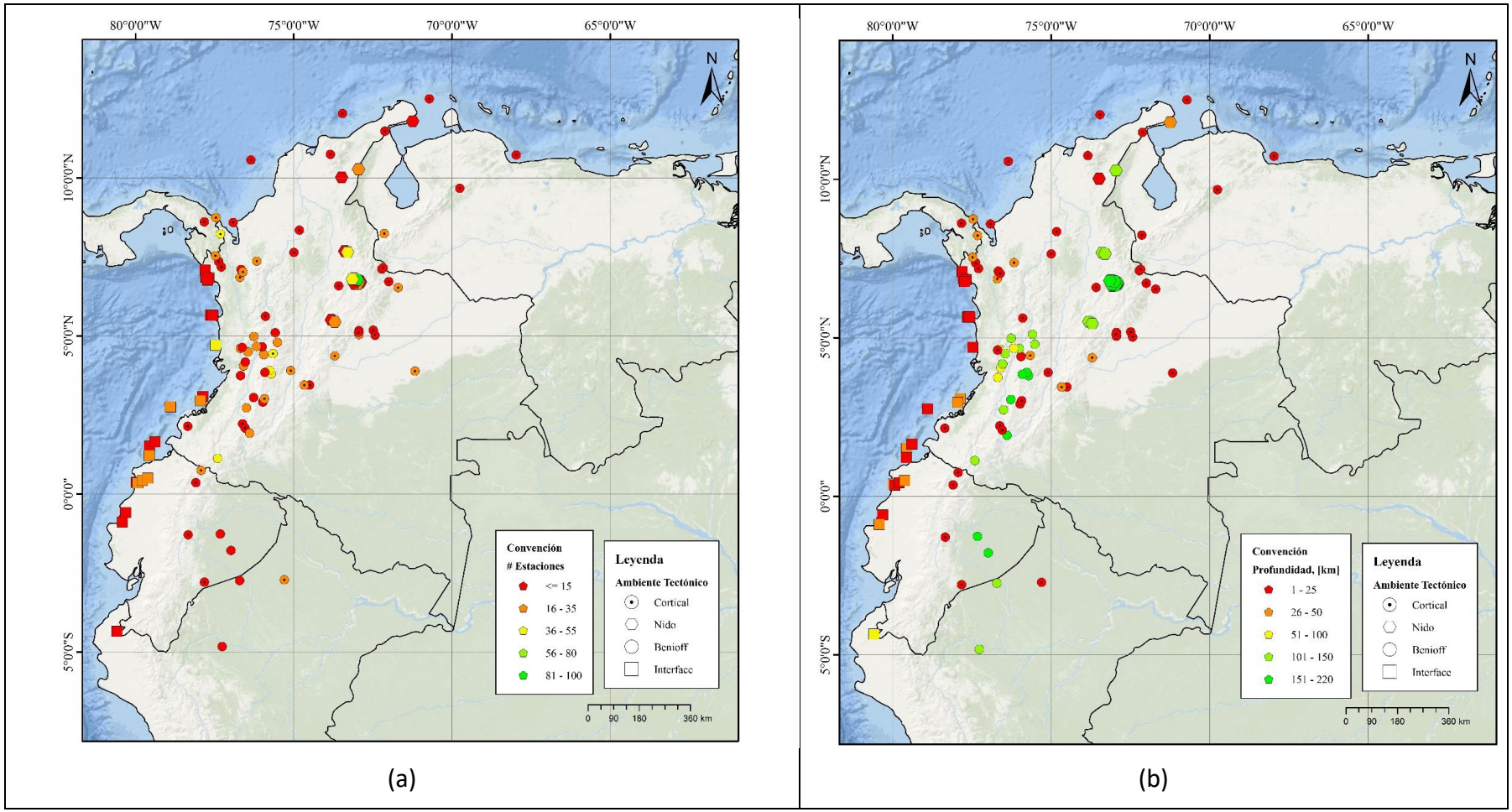



**Figura 25. (a) Distribución de los registros de la base de datos de movimiento fuerte; (b) distribución de las profundidades de los eventos**

Fuente: autores

Adicional al número de registros, es importante observar tanto la profundidad como la magnitud de los eventos. En cuanto a las profundidades promedio, se tienen dos zonas con profundidades menores a 30 km, como lo son la zona cortical y la zona Interplaca, mientras que para la zonas de Benioff y Nido se observan profundidades que por lo general superan los 100 km (ver Tabla 16). La distribución de las profundidades de los eventos se puede observar en la Figura 25 (b)

La Figura 26 presenta la distribución de los eventos según magnitudes y ambiente tectónico. En esta Figura se observa que las mayores magnitudes se encuentran en la zona de subducción del pacífico, con valores mayores a 7.5, mientras que la mayoría de eventos registrados tienen magnitudes menores a 6.

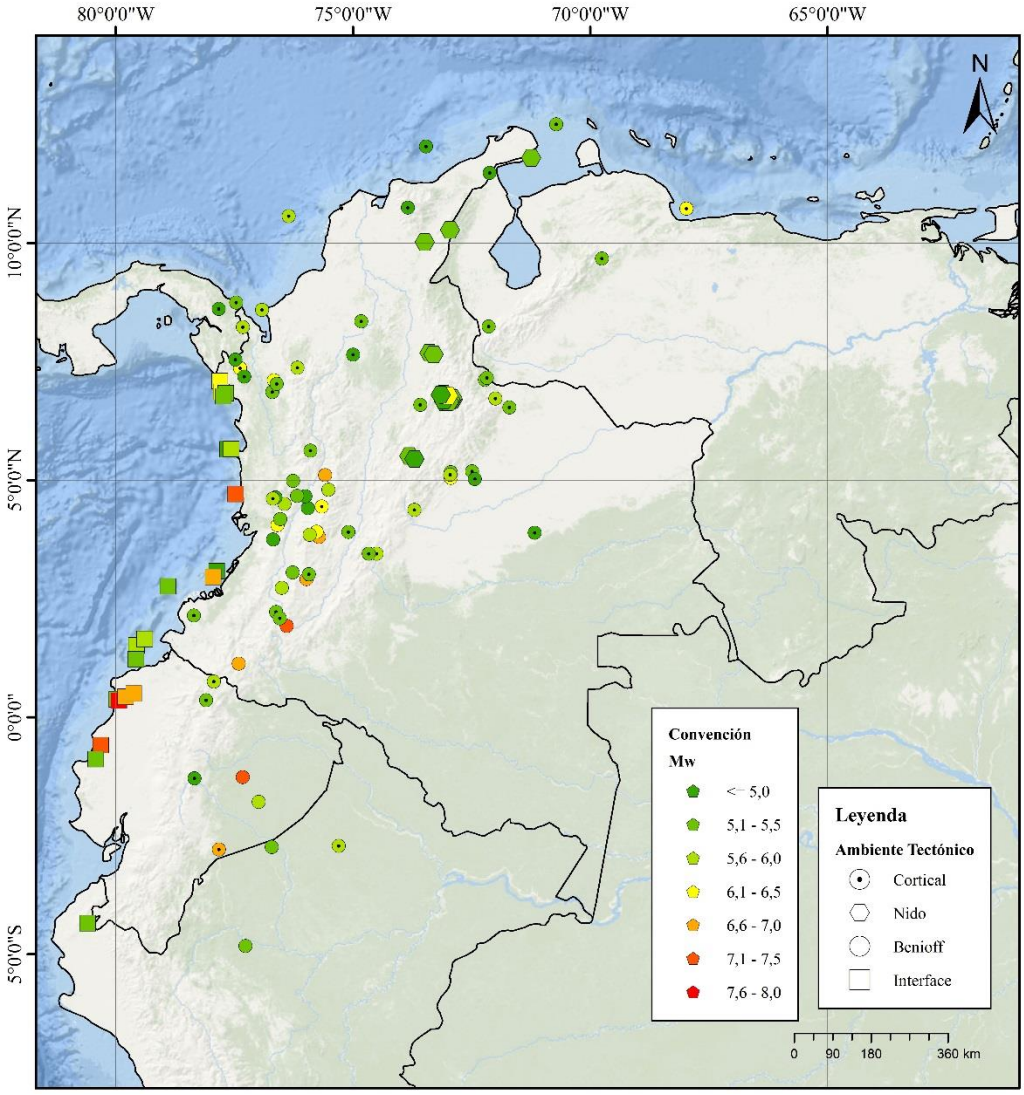



**Figura 26. Distribución de magnitudes (Mw) para los eventos seleccionados**

Fuente: autores

Los mecanismos focales fueron agrupados en normales (N), inversos (R) y strike-slip (S) (Kaverina et ál., 1996). En la Figura 27 se observa que en la zona interplaca predominan los sismos de mecanismo inverso a lo largo de toda la costa pacífica, desde el norte de Perú hasta la frontera entre Colombia y Panamá. Por otro lado, los de tipo strike-slip predominan en la zona cortical. En las zonas intraplaca, o *Inslab*, se encuentran zonas complejas, compuestas por sismos de diversos mecanismos en un área muy reducida. En la Tabla 17 se puede observar el número de eventos por mecanismo focal en cada una de las cuatro regiones tectónicas.

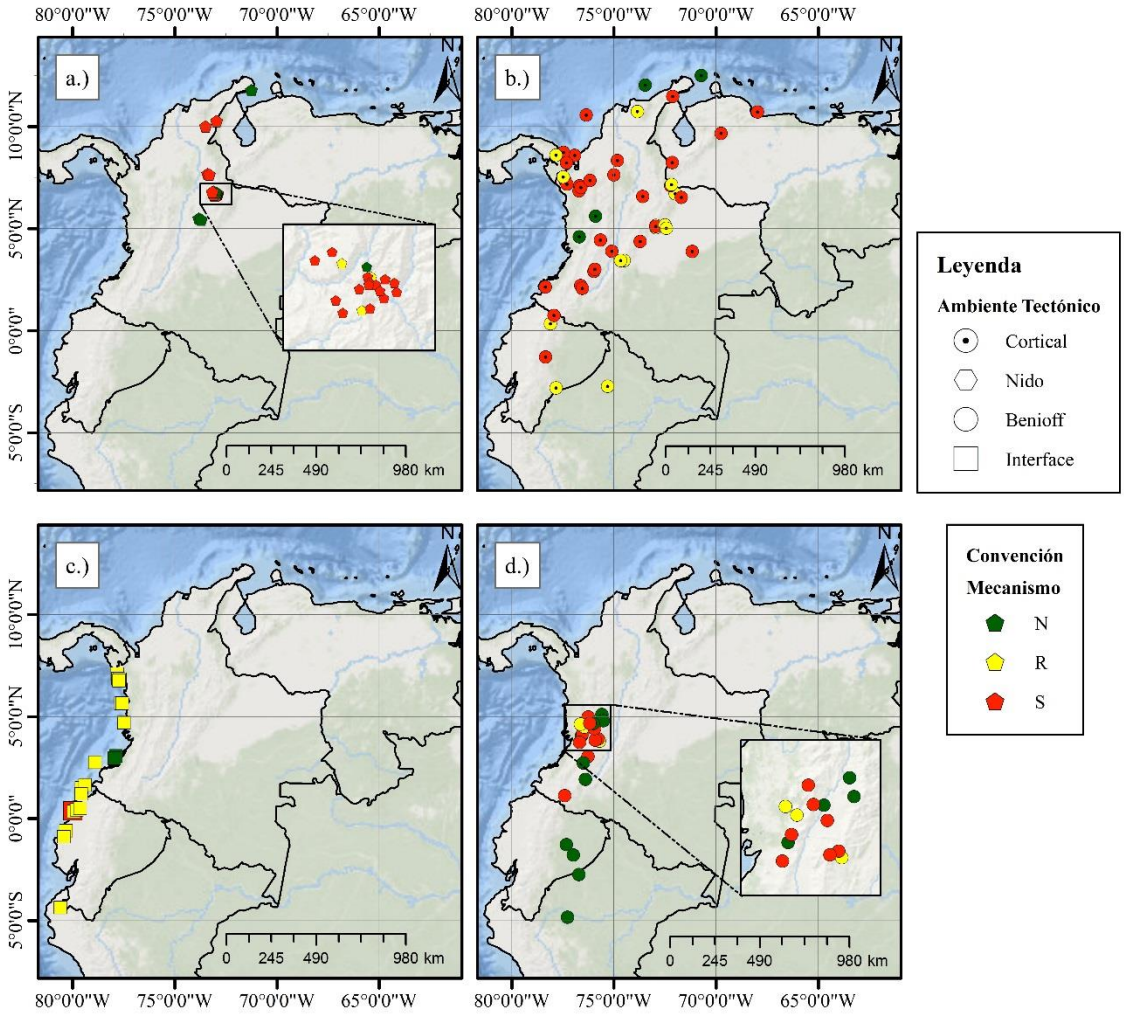



**Figura 27. Distribución de mecanismos focales por región tectónica. a) Nido. b) Cortical. c) Interface y d) Benioff.**

Fuente: autores

**Tabla 17. Número y tipo de mecanismos focales por región tectónica**

| Ambiente Tectónico | Normal (N) | Inverso (R) | Strike Slip (S) |
|---|---|---|---|
| Cortical | 4 | 14 | 31 |
| Nido | 4 | 3 | 19 |
| Benioff | 10 | 3 | 9 |
| Interface | 2 | 18 | 1 |

Fuente: autores

Para mayor detalle sobre la base de datos de movimiento fuerte se recomienda consultar el Anexo A.

### 3.3.2 Base de datos de Estaciones

Para cada una de las estaciones de medición se definieron las variables geotécnicas de mayor relevancia y uso para evaluar efectos sísmicos de sitio en ecuaciones de atenuación. De esta manera, se calcularon los valores de $Z_1$ y $Z_{2.5}$, que corresponden a las profundidades para las cuáles se encuentran velocidades de onda cortante (Vs) de 1 y 2.5 $km/s$, respectivamente. Además, se calculó para cada estación, el valor de $Vs_{30}$, que corresponde al promedio de la velocidad de onda de corte para los 30 metros más superficiales del suelo.

El valor de $Vs_{30}$ ha sido utilizado ampliamente para la clasificación de suelos, la definición de factores de amplificación y la estimación simplificada de efectos de sitio (Dobry et ál., 2000). En la Figura 28 se presenta la distribución de los valores de $Vs_{30}$ de las 206 estaciones para las cuáles se tienen registros.

Los valores de $Vs_{30}$ fueron obtenidos cuando no se tuvo una medición directa, siguiendo la metodología sugeridas por Wald & Allen (2009), Wald et ál. (2011), Thompson & Wald (2012) y Thompson et ál. (2014). De esta manera, el valor de $Vs_{30}$ fue asignado a las estaciones utilizando la versión actualizada del mapa nacional realizado por el SGC en el año 2016, con una resolución de 7.5 arcosegundos.

Para el cálculo de $Z_{1.0}$ y $Z_{2.5}$ para el territorio colombiano (continental e insular), se usó información disponible generada por mediciones geofísicas o directas como perforaciones, además de estudios de tomografía y los mapas de variación de la velocidad de onda de corte (Vs) en la corteza intermedia y superior en la zona de estudio (Poveda et ál., 2018).

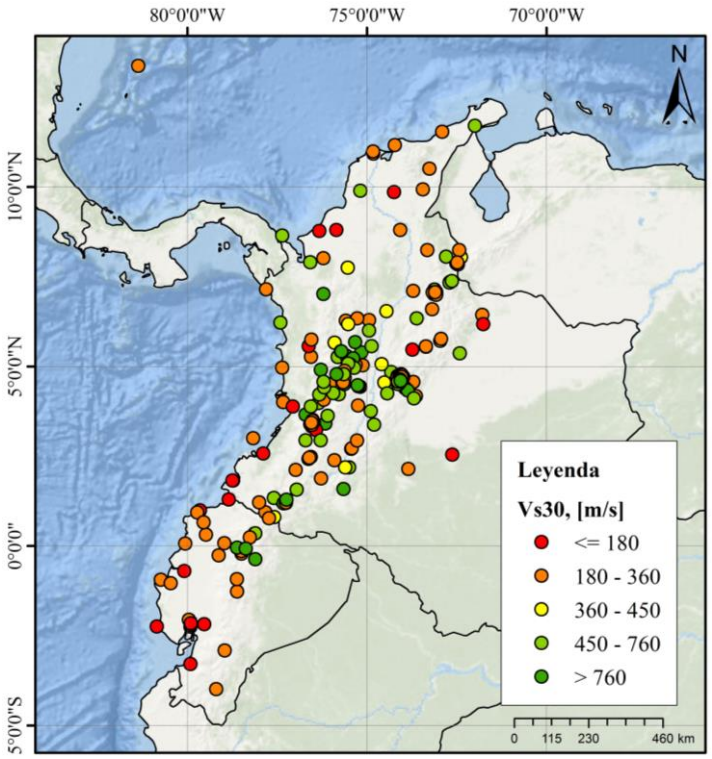



**Figura 28. Vs30 [m/s] inferido para las estaciones de registro**

Fuente: autores

Debido a que esta información no cubre el área total estudiada, se utilizó una malla igualmente espaciada de aproximadamente 10x10 km en la cual se asignaron valores promedio de $Z_{1.0}$ y $Z_{2.5}$ siguiendo las ecuaciones que relacionan $Vs_{30}$ y $Z_{1.0}$, tales como las desarrolladas por Abrahamsom y Silva (2008), Chiou & Youngs (2008) y Chiou & Youngs (2014).

Para la estimación de $Z_{1.0}$ se seleccionaron aquellos valores estimados a partir de Abrahamson y Silva (2008) después de un análisis de control, coherencia y ajuste con los datos existentes. Para la estimación de $Z_{2.5}$, en los casos sin información disponible, se usó la ecuación propuesta por Campbell y Bozorgnia (2007).

Con el fin de observar los contrastes de frontera de estos modelos y ajustar los calculados, se compararon los valores de Poveda et ál. (2018) y los calculados con Abrahamson y Silva (2008). Finalmente, los valores estimados de $Z_{1.0}$ y $Z_{2.5}$ fueron integrados con la información disponible para generar un modelo final. Los valores de $Z_{1.0}$ y $Z_{2.5}$ asignados a las estaciones acelerográficas se presentan en la Figura 29.

Además de estos valores estimados que permiten estimar el efecto de las cuencas en los registros sísmicos, se asignó a cada estación una variable que permite validar la posición de cada estación con respecto al arco volcánico (ver Figura 30 ).

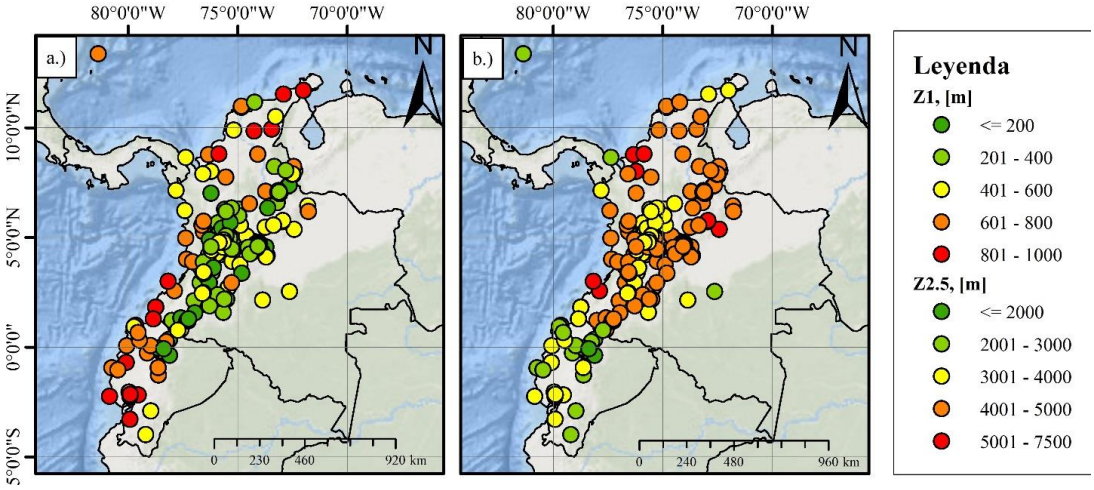



**Figura 29. a.) Z1 y b.) Z2.5 [m] inferido para las estaciones de registro**

Fuente: autores

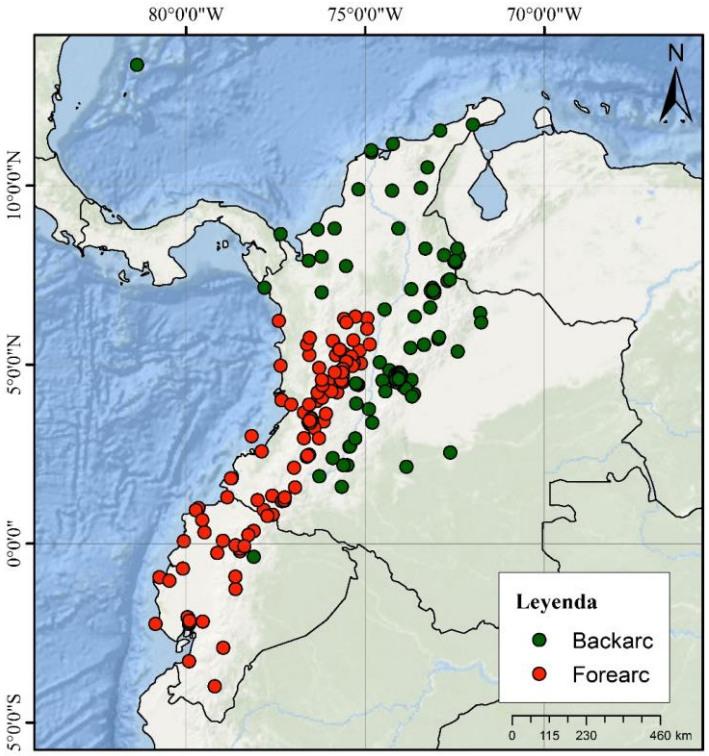



**Figura 30. Distribución de las estaciones de registro alrededor del arco volcánico**

Fuente: autores

A partir de la caracterización de las estaciones, la Tabla 18 presenta el número de registros por rango de $Vs_{30}$ y fuente sismogénica. Esta clasificación es útil para incluir de manera aproximada los efectos de sitio en la estimación de la amenaza sísmica.

**Tabla 18. Número de eventos por rango de Vs30 y fuente sísmica**

| *Rango Vs30* | *Cortical* | *Bucaramanga* | *Benioff* | *Inter placa* | *Total* |
|---|---|---|---|---|---|
| ***<180*** | 36 | 56 | 35 | 41 | 168 |
| ***180-360*** | 252 | 199 | 175 | 124 | 750 |
| ***360-450*** | 31 | 27 | 12 | 2 | 72 |
| ***450-760*** | 197 | 149 | 122 | 52 | 520 |
| ***>760*** | 91 | 54 | 91 | 40 | 276 |
| ***Total*** | 607 | 485 | 435 | 259 | 1786 |

Fuente: autores

### 3.3.3 Procesamiento de acelerogramas

Los registros acelerográficos dentro del catálogo construido fueron procesados con una adaptación de la metodología desarrollada por el PEER (Ancheta et ál., 2013), que se resume en un proceso iterativo en donde el registro se somete a una corrección de línea base y a un proceso de filtrado en el dominio de la frecuencia.

En la Figura 31 se presenta un esquema del proceso de filtrado adaptado para el presente estudio, partiendo de que las señales a analizar ya contienen una corrección instrumental. El proceso detallado para el procesamiento de las señales de aceleración se presenta en el Anexo B.

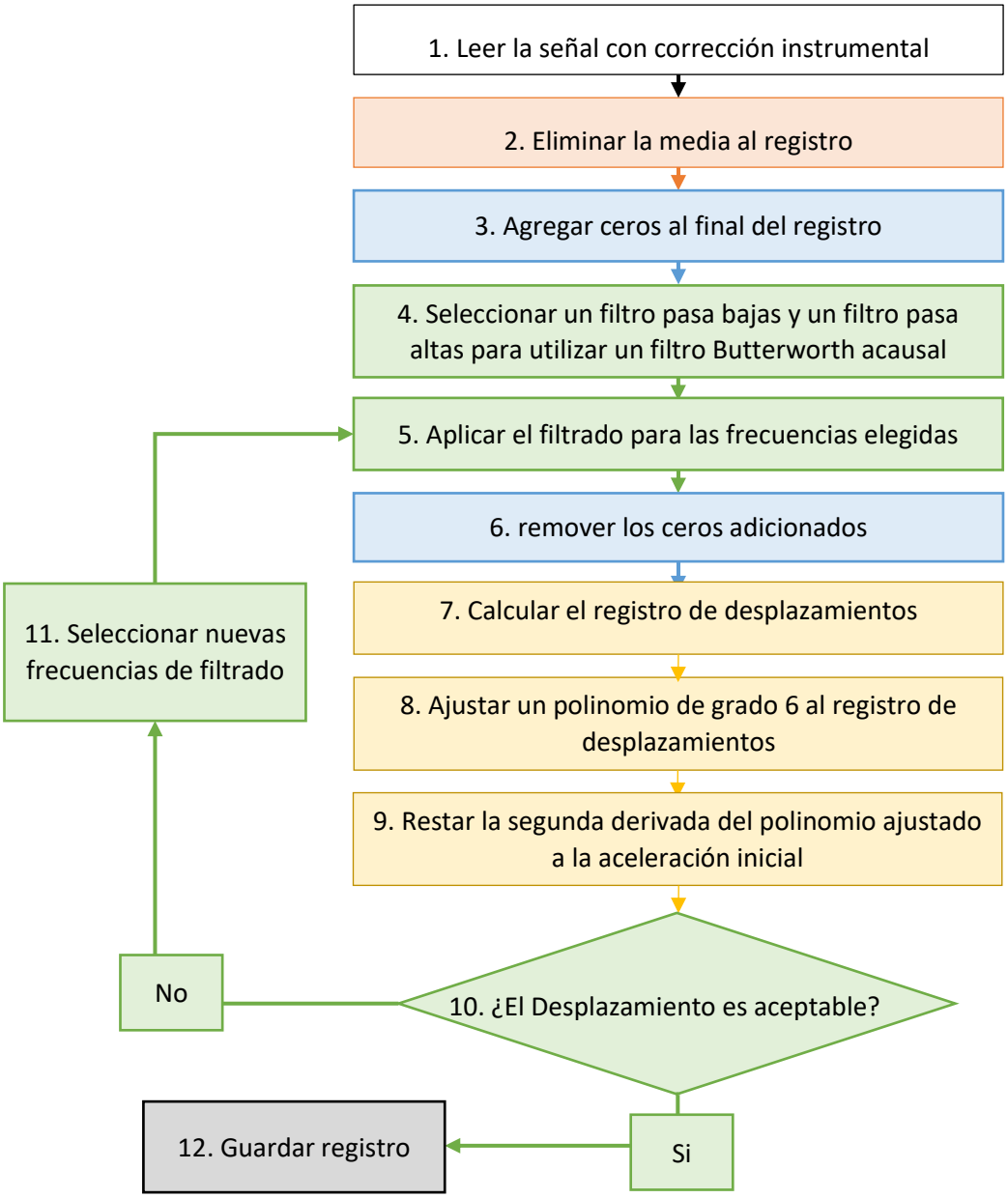



**Figura 31. Esquema de procesamiento de acelerogramas**

Fuente: autores

# 4. MODELO DE FUENTES SÍSMICAS

Entre los componentes del análisis de amenaza sísmica, un modelo de fuentes es una herramienta para caracterizar una zona de estudio según la magnitud y recurrencia de los sismos que puede generar. Para este fin, es necesario identificar y definir las fuentes presentes en dicha zona.

En geología, una fuente sísmica es un volumen de la litósfera dentro del cual se presume que pueden ocurrir sismos con origen tectónico similar (Sarria, 1995). Para definir estas fuentes es relevante conocer su ubicación, su actividad (descrita en términos de la recurrencia de magnitudes de sismos asociados a dicha fuente), así como la magnitud máxima de los sismos que puede producir (Sarria, 1995).

En Colombia se han propuesto diferentes modelos de fuentes sísmicas. Entre los resultados más recientes se encuentran los elaborados por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS 2009, publicado en Salgado et ál., 2010) y que han servido de soporte para la definición de coeficientes sísmicos de diseño del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (MAVDT, 2010). En dicho estudio se determinó un conjunto de polígonos para describir la sismicidad de fuentes superficiales, así como un conjunto de zonas para modelar sismos profundos relacionados con procesos de subducción en el pacífico y en el nido sísmico de Bucaramanga (ver Figura 32).

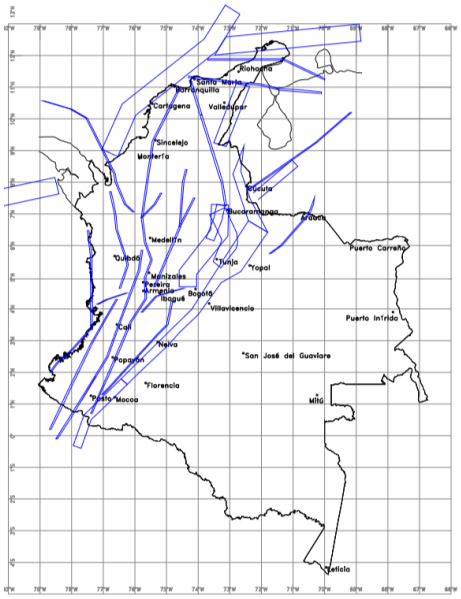
A su vez, el Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas, hoy Servicio Geológico Colombiano - SGC) y la Universidad Nacional elaboraron en conjunto un modelo de amenaza sísmica (Ingeominas – Universidad Nacional, 2010). La Figura 32 (c) presenta las fuentes consideradas en dicho modelo.

Tanto los modelos como los resultados de los anteriores estudios (Comité AIS 300 e Ingeominas y Universidad Nacional), fueron revisados por el Doctor Mario Ordaz, mediante un convenio en el que participaron el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y la AIS. A través de dicho convenio se buscó tener un control de calidad de los estudios de amenaza existentes. Como resultado de esta revisión se obtuvieron diversas observaciones y comentarios a cada modelo, las cuales fueron atendidas por los autores y a partir de las cuales se elaboró uno definitivo (MAVDT, 2010).

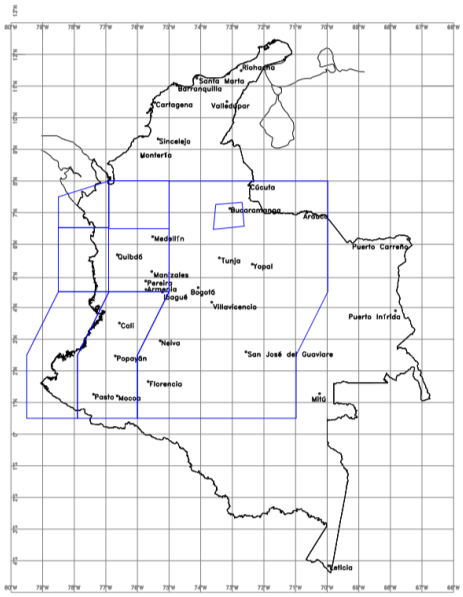
Entre los resultados de dicho proceso de evaluación, vale la pena resaltar que (a juicio del revisor) las fuentes propuestas por Ingeominas (ver Figura 32 c), reflejaban un buen conocimiento de los procesos tectónicos del país, valorándose como un modelo de fuentes más avanzado respecto al utilizado en los cálculos del mapa de amenaza de la Norma Sismo Resistente NSR-98 (Ordaz, 2009).

Considerando que la definición de fuentes sísmicas puede ser subjetiva y que puede estar determinada por el criterio de expertos (Ansari et ál., 2015), el SGC en conjunto

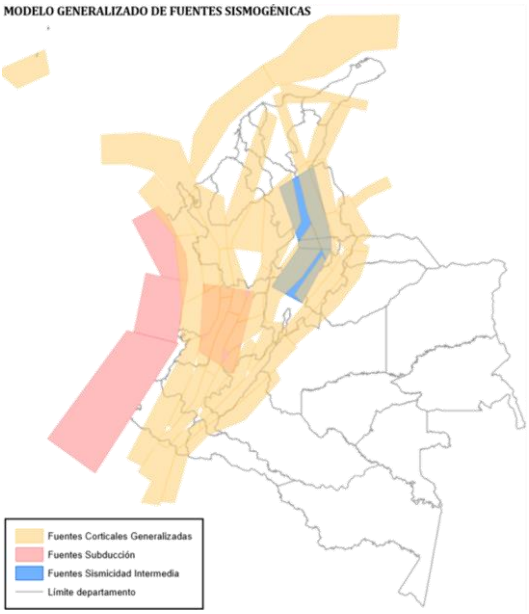
con investigadores del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) elaboraron un procedimiento para la definición de fuentes sísmicas. Dicho procedimiento fue aplicado a Colombia (Arcila et ál., 2017) y sus resultados han sido presentados en foros de amenaza sísmica promovidos por el SGC.




(a) Planos de fuentes superficiales




(b) Plano de fuentes profundas




(c) Fuentes propuestas por Ingeominas y Universidad Nacional

**Figura 32. Fuentes sismogénicas propuestas por AIS (2009) (a) superficiales; (b) profundas (c) zonificación propuesta por Ingeominas y la Universidad Nacional (2010)**

A partir del conocimiento existente y con el fin de contribuir a la definición de fuentes sísmicas con fines de evaluación de amenaza, el SGC en conjunto con la Fundación Global Earthquake Model (GEM) elaboró un modelo cuyas principales características se describen en este capítulo. En la Figura 33 se presenta un esquema de las principales actividades y componentes de dicho modelo.

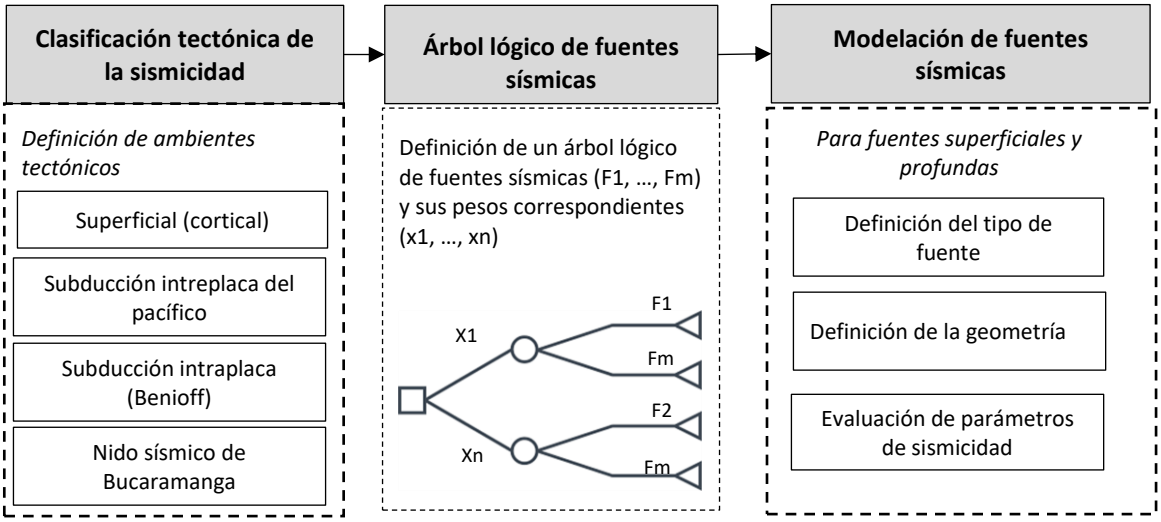



**Figura 33. Esquema general de actividades del modelo de fuentes sísmicas**

Fuente: autores

De acuerdo con García-Mayordomo (2015), las fuentes sísmicas determinan la distribución geográfica del peligro sísmico. Por esta razón, es relevante dedicar esfuerzos en la definición de un modelo de fuente sísmicas a partir de datos actualizados, considerando la participación de un equipo multidisciplinario que vincule criterios geológicos, sismológicos y estadísticos, orientados a la estimación de la amenaza en formatos que sean de utilidad para la comunidad en general. Tales son los principios orientadores que el SGC acogió para la elaboración del modelo de fuentes sísmicas (y en general del modelo de amenaza) del presente estudio.

En este capítulo se presenta una descripción de los insumos, metodologías y resultados respecto a la caracterización de fuentes sísmicas de Colombia, considerando diferentes ambientes tectónicos, diferentes alternativas para la modelación de la sismicidad y diferentes supuestos respecto a la geometría de las fuentes.

## 4.1 Clasificación tectónica de la sismicidad

Entre los esfuerzos para comprender la amenaza sísmica, el estudio de la tectónica es útil para identificar procesos de deformación de la corteza terrestre, los cuales

determinan la distribución geográfica, ocurrencia y características de los sismos. Tal análisis es relevante, entre otros aspectos, para identificar regiones (ambientes tectónicos), que originen sismos de propiedades similares.

A nivel global existen diversos estudios en los que se ha llevado a cabo una regionalización tectónica. En Chen et ál. (2018) se presenta una metodología y resultados para llevar a cabo una regionalización útil para la evaluación de la amenaza sísmica, a partir de información de catálogos sísmicos, información geológica y sismológica, entre otras fuentes de información.

En Chen et ál. (2018) las zonas se clasifican en regiones oceánicas (estables o activas), regiones continentales (estable o superficial activa); así como zonas de procesos de subducción (ver Figura 34). De este análisis, se encuentra que en el territorio colombiano se encuentran, principalmente, regiones superficiales activas, procesos de subducción y zonas continentales estables (no cratónicas).

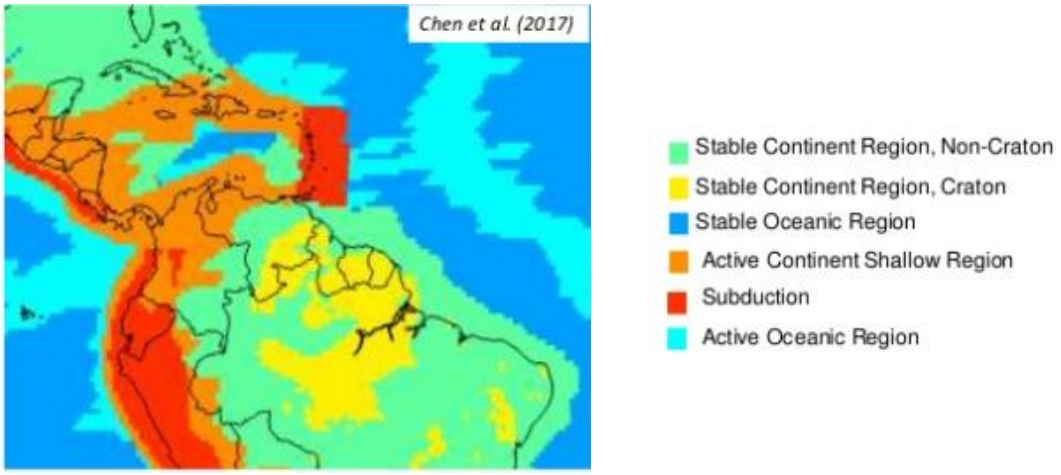



**Figura 34. Tectónica regional**

Fuente: Chen et ál. (2018)

En el estudio de la tectónica del territorio colombiano se han propuesto diferentes modelos (por ejemplo, Taboada et ál., 1998; Taboada et ál., 2000) los cuales examinan los complejos procesos geodinámicos presentes en la región. En tales modelos se consideran (entre otras) las siguientes dinámicas (ver Figura 35):

- La convergencia de las placas de Nazca y del Caribe hacia la placa de Suramérica.
- El desplazamiento del bloque de Panamá en sentido W-E hacia la placa de Suramérica.
- El desplazamiento del Bloque de los Andes en dirección SSW-NNE.

De acuerdo con Taboada et ál. (1998), en Colombia se presentan principalmente los siguientes ambientes tectónicos: (i) sismos de corteza asociados a los principales

sistemas de fallas (sismicidad Andina); (ii) sismicidad de subducción del Pacífico; (iii) sismicidad intermedia de Boyacá-Santander y Nido de Bucaramanga; (iv) sismicidad de corteza difusa.

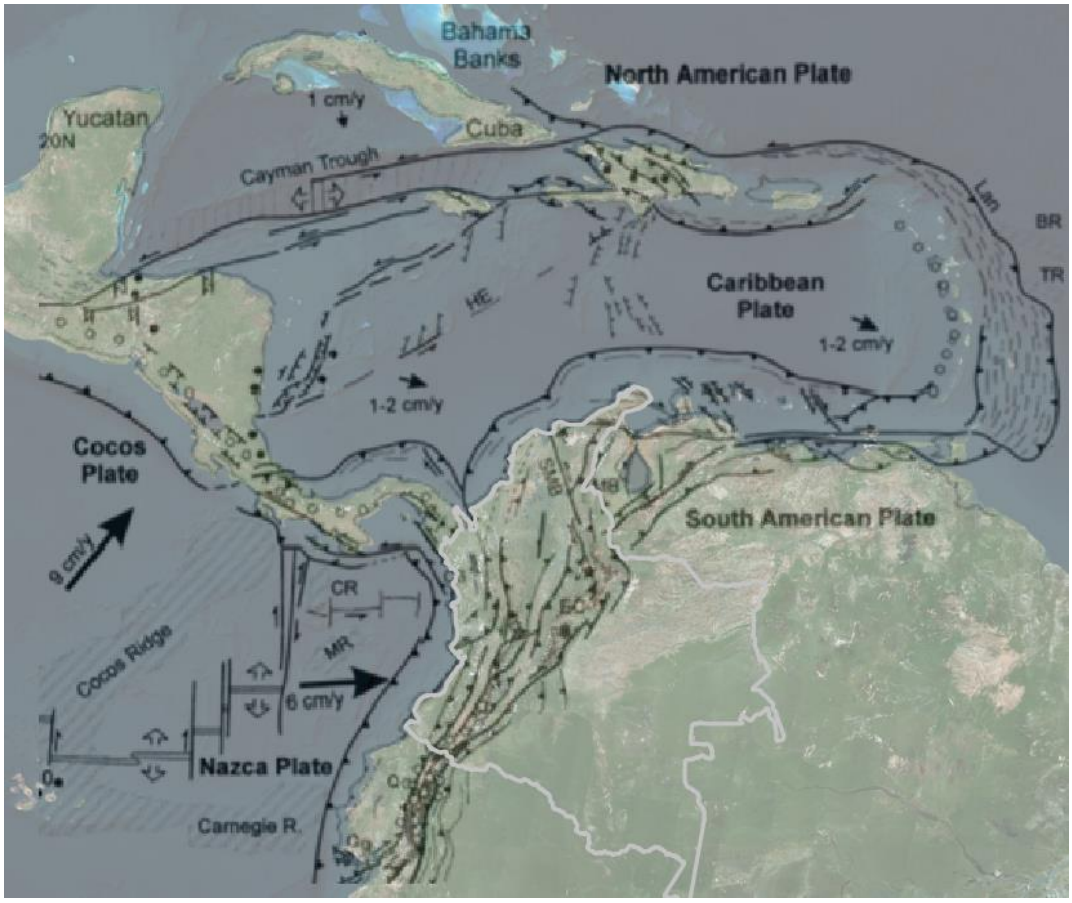



**Figura 35. Configuración neotectónica de la región Caribe y el Norte de Los Andes**

Fuente: adoptado de Taboada et ál. (2000)

A partir del conocimiento tectónico existente (relevante para la modelación de la amenaza sísmica), en el presente estudio se han considerado los siguientes ambientes tectónicos: (i) superficial (cortical); (ii) zona interplaca del proceso de subducción del pacífico; (iii) zona intraplaca (profunda) del proceso de subducción del pacífico (Benioff); (iv) zona de subducción profunda del nido de Bucaramanga. A continuación, se presenta una breve descripción de estos ambientes.

### 4.1.1 Cortical

La actividad sísmica cortical (superficial) está acotada por el límite corteza-manto superior o discontinuidad de Mohorovičić ("moho"). Generalmente, este límite se asocia a profundidades menores a 70 km. No obstante, este límite es variable y debe ser bien establecido en regiones como Colombia, en donde diversos tipos de ambientes tectónicos están intrínsecamente relacionados.

Existen varios modelos que predicen este límite (o el espesor de la corteza) utilizando diferentes metodologías y escalas (Laske et ál., 2013; Pasyanos et ál., 2014; van der Meijde et ál., 2013). En el presente estudio se adoptó un modelo predictivo de la profundidad del límite moho, el cual fue creado por especialistas del SGC (ver Figura 36).

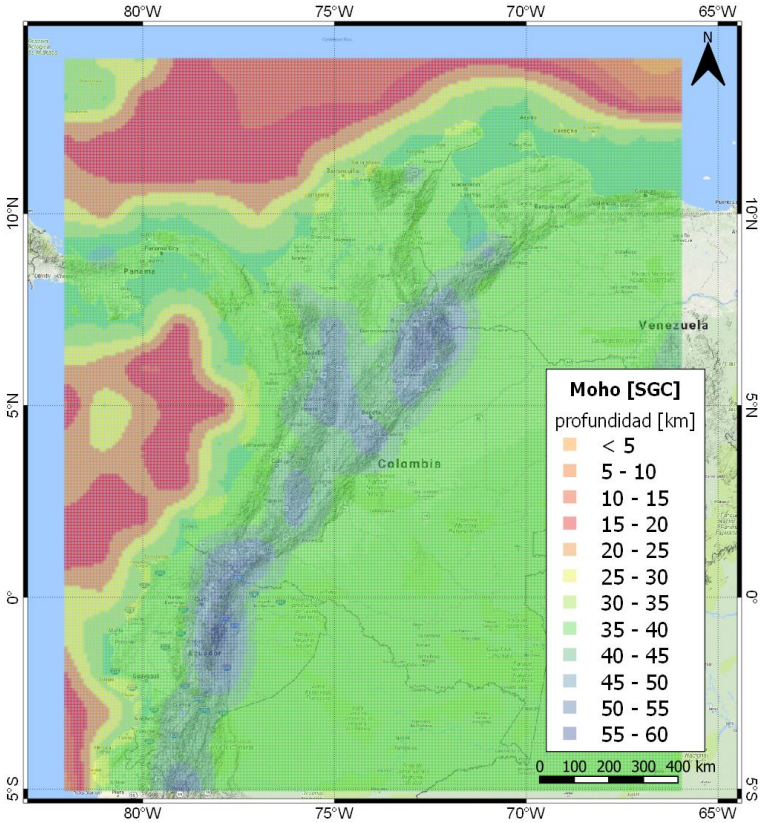



**Figura 36. Mapa del límite de la transición corteza-manto ("moho") en la región de estudio**

Fuente: Arcila (sin publicar)

### 4.1.2 Zona de subducción del pacífico (interplaca)

En términos generales, un proceso de subducción corresponde al choque entre placas litosfericas, en el cual, una de las placas se desliza por debajo de la otra (ver Figura 37). A los sismos que ocurren entre los límites de convergencia de dos placas se les denomina interplaca (Sarria, 1995).

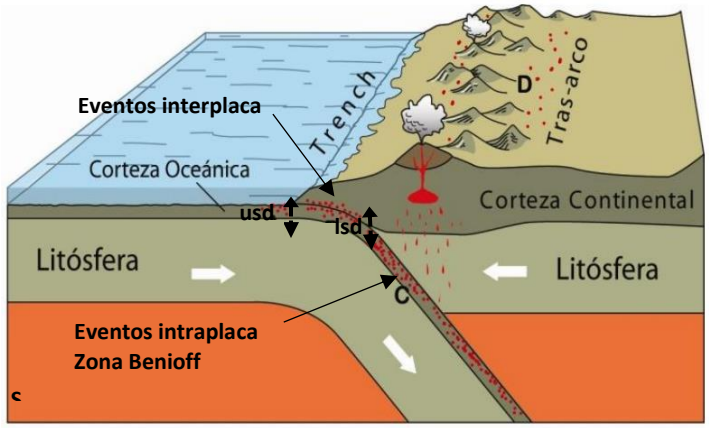



**Figura 37. Esquema de proceso de subducción**

Fuente: adoptado de CSN (s/f)

En particular, la subducción del pacífico colombiano corresponde a la zona de contacto entre la placa de Nazca con la placa Sur América. En esta zona se han originado sismos de magnitudes considerables, tales como los ocurridos cerca de Tumaco en enero de 1906 (magnitud 8.8 Mw) y el de diciembre de 1979 (magnitud 8.1 Mw). Estos sismos causaron colapsos y daños significativos en los municipios vecinos, tanto por los movimientos del terreno como por las olas de tsunami generadas durante estos eventos.

### 4.1.3 Zona de Benioff

La zona de Benioff es un ambiente tectónico que hace parte del proceso de subducción. Corresponde a la parte de la placa que penetra (subduce) bajo la otra, con una inclinación gobernada por condiciones regionales, con ángulos variables (Sarria, 1995). Los sismos que ocurren dentro del volumen subducido se les denomina intraplaca y se asocian a la zona de Benioff. En la Figura 37 se presenta un esquema de dicha zona.

En particular, la zona de subducción del pacífico se desarrolla desde el pacífico, hacia el interior del continente, en un rango de 300 km (ver Figura 38).

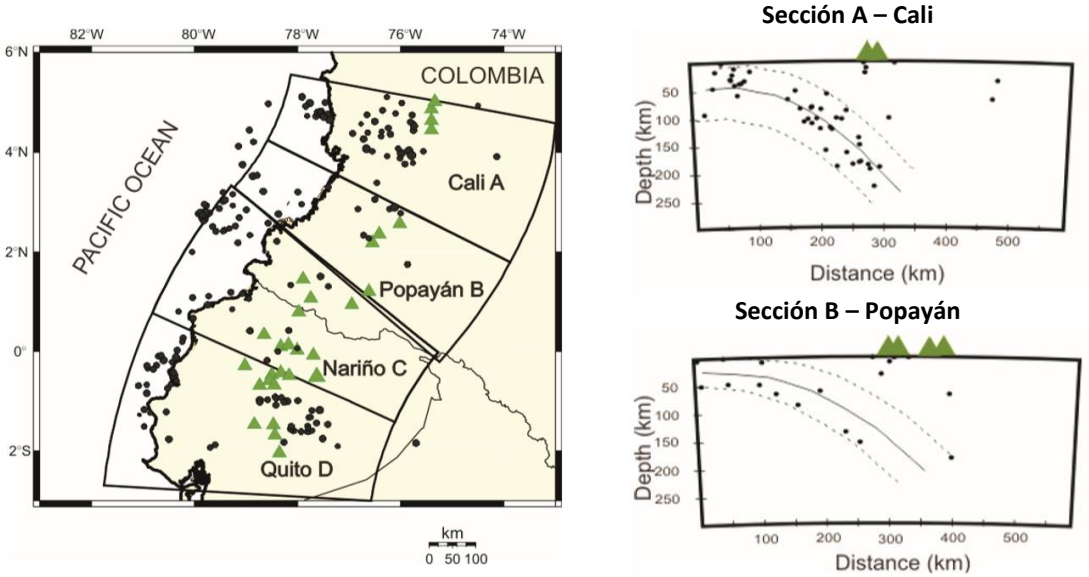



**Figura 38. Secciones transversales perpendiculares a la trinchera del Pacífico**

Fuente: Pedraza-García et ál. (2007)

En términos generales, para diferenciar los eventos interplaca de los intraplaca (de la zona de Benioff), se consideran, entre otros, los siguientes criterios: la profundidad de los sismos (siendo más profundos los intraplaca); la localización del arco volcánico, la cual está relacionada con la zona de Benioff (ver Figura 38); el tipo de mecanismos focales, siendo en su mayoría de tipo de inverso (reverse) para sismos interplaca, mientras que mecanismos compuestos o normales se observan para eventos intraplaca.

Los sismos (intraplaca) de la zona de Benioff pueden contribuir notablemente a la amenaza de una región. Ejemplos de este tipo de eventos corresponden a los siguientes sismos ocurridos en México: el de 1858 (M ~ 7.7), el cual tuvo efectos en la ciudad de México; el sismo de 1931 (Mw 7.8) el cual causó gran destrucción en la ciudad de Oaxaca (García, 2005); el evento de 2017 en Puebla y Morelos (Mw 7.1), el cual causó numerosos colapsos y daños severos en construcciones. En particular, Singh et ál. (2018) señalan que, en el caso de Ciudad de México, los registros de los eventos intraplaca de 2017 tienen mayores aceleraciones que los registros de eventos interplaca del sismo de 1985 (Mw 8.1) para periodos de vibración menores a 0.6 segundos. En Colombia, eventos de este tipo de han ocurrido entre otros en los años 1938, 1961, 1962, 1979 y 1995.

### 4.1.4 Sismicidad intraplaca del nido sísmico de Bucaramanga

Un nido sísmico es un volumen de actividad sísmica intensa, persistente en el tiempo y aislado de la actividad de sus alrededores. El nido sísmico de Bucaramanga corresponde a una zona en la que frecuentemente se generan sismos de magnitudes Mw entre 4.0 y 5.0, a profundidades entre 140 y 200 km (Prieto et ál., 2012).

De acuerdo con Schneider et ál. (1987), el reducido tamaño del nido sísmico de Bucaramanga, la variabilidad de los mecanismos focales identificados, así como la escasez de sismicidad en los alrededores, hacen difícil que se presente una explicación coherente del origen de tal nido.

En Sepúlveda-Jaimes y Cabrera-Zambrano (2018) se presenta un recuento de diferentes modelos planteados sobre el nido sísmico de Bucaramanga. Los autores resaltan que, debido a la complejidad del proceso, resulta difícil establecer cuál es la placa que subduce; si es la placa Caribe subduciendo bajo la placa de Sur América (de acuerdo con Pennington, 1983), si está relacionado con la placa de Nazca, en un segmento denominado Bloque de Bucaramanga (según Van der Hilst y Mann, 1994) o si está relacionado con el choque entre las placas Nazca y Caribe (según Zarifi et ál., 2007).

La Figura 39 presenta la localización del nido sísmico de Bucaramanga, así como secciones transversales que permiten identificar la profundidad y ubicación de los sismos correspondientes.

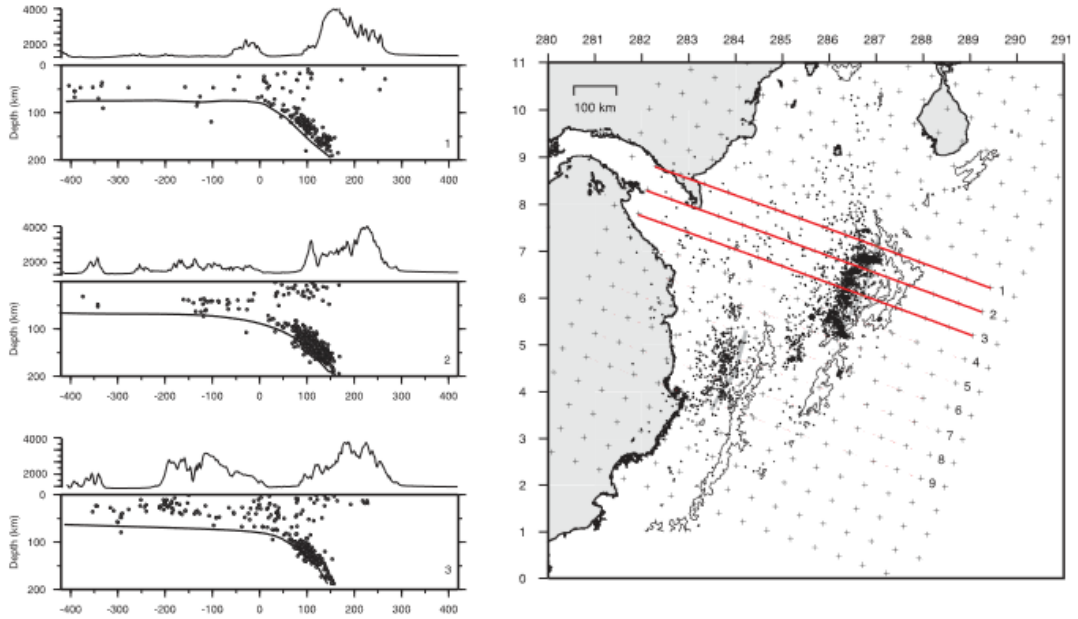



**Figura 39. Secciones transversales en la localización del nido sísmico de Bucaramanga**

Fuente: Chiarabba et ál. (2015)

### 4.1.5 Criterios para la clasificación de sismos según ambientes tectónicos

La clasificación sismotectónico de la sismicidad es un procedimiento relevante para la definición de las fuentes sísmicas. Con el fin de enfrentar el complejo ambiente sismotectónico del país y realizar una clasificación objetiva, en el presente estudio se adoptó un procedimiento similar a los propuestos por Zhao et ál., (2015) y García et ál., (2012), en el cual a cada evento del catálogo se otorga un ambiente sismotectónico univoco (cortical, interplaca, Benioff, nido sísmico de Bucaramanga, ver Figura 40) siguiendo un esquema de clasificación específico.

Dicho esquema de clasificación se determina según a la proximidad del hipocentro de los sismos a los limites definidos a priori para cada ambiente tectónico (moho, limite-corteza manto, límite superior e inferior de la subducción, limite último entre la zona interplaca y la zona intraplaca). Los criterios adoptados para clasificar sismos según ambientes tectónicos son los siguientes:

(i) *Clasificación de eventos corticales*: En este paso se verifica si la profundidad del evento está acotada por el límite corteza-manto superior o moho (Figura 36).

(ii) *Clasificación de eventos interplaca e intraplaca*: Los eventos pertenecientes a la zona interplaca son clasificados según su proximidad a los limites geométricos definidos en este modelo (Figura 40). Si un evento ya clasificado como cortical se encuentra dentro de los límites del ambiente interplaca, se le otorga dicho ambiente. Para los eventos pertenecientes a la zona intraplaca y del nido de Bucaramanga se sigue un procedimiento similar para su clasificación o reclasificación.

(iii) *Ajuste y corrección:* A partir de una inspección visual de la clasificación se realiza un ajuste o modificación de la misma, en especial para eventos históricos o pre-instrumentales para los cuales se cuenta con una pobre definición de la profundidad hipocentral. Entre los ajustes realizados se encuentran los siguientes casos: (a) clasificación especifica de un conjunto de hipocentros delimitados por un polígono en una cierta región (exclusión de sismos volcánicos o inducidos); (b) Filtrado de eventos de determinado intervalo de magnitud en una ventana temporal específica

En el presente estudio, eventos con profundidades mayores a 400 km no se clasifican a priori en algún ambiente tectónico; por lo tanto, estos eventos no se utilizan, teniendo en cuenta que estos difícilmente generan en superficie intensidades relevantes para la amenaza.

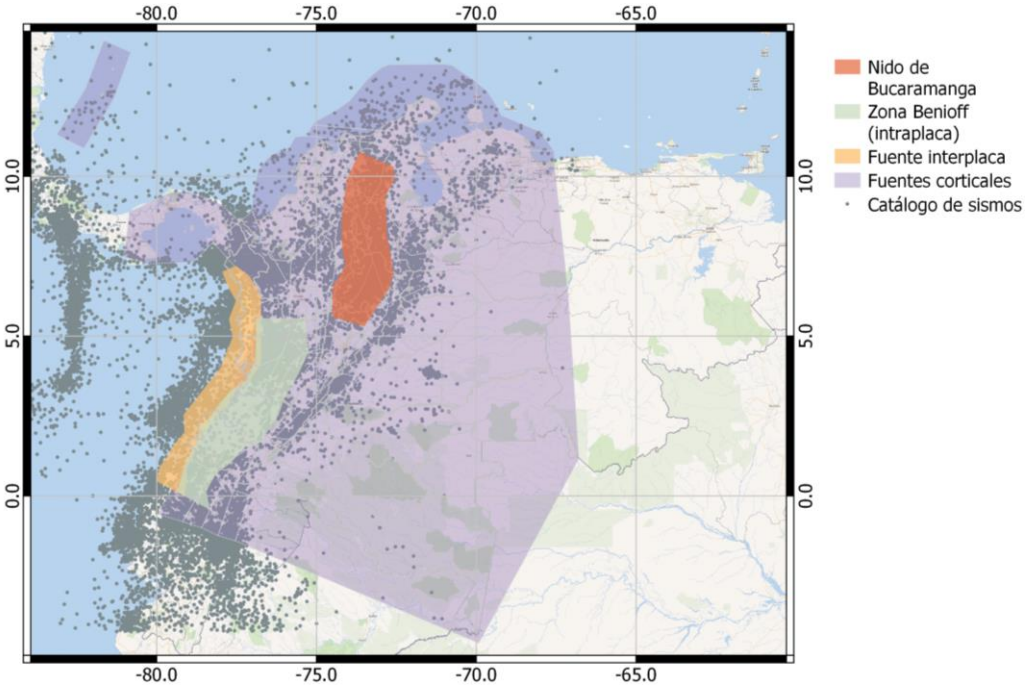



**Figura 40. Ambientes tectónicos definidos en el modelo**

Fuente: autores

**Nota**: Detalles de la geometría de las fuentes según ambientes tectónicos se presentan a lo largo del capítulo.

El proceso de clasificación tectónica de la sismicidad se realizó utilizando la herramienta *Subduction Toolkit*, la cual está disponible en el componente Model Building Toolkit del motor de cálculo OpenQuake (GEM ScienceTools - oq-mbtk), la cual permite implementar los criterios y límites establecidos para cada ambiente tectónico.

Sobre este procedimiento es relevante anotar que tanto la definición de los límites, como la localización de los eventos del catálogo es un proceso incierto, razón por la cual durante el proceso de clasificación existe la posibilidad de introducir incertidumbres a la geometría definida de cada límite tectónico.

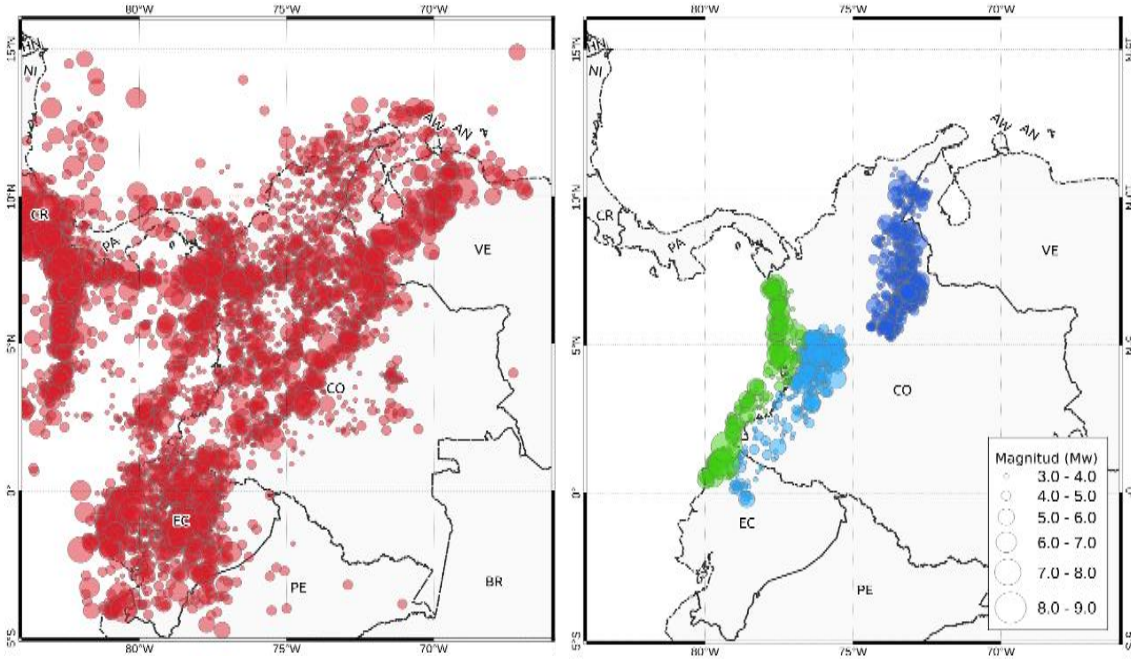
La Tabla 19 presenta los resultados de la clasificación de eventos según modelos de fuentes y ambientes tectónicos. La descripción de los modelos de fuentes (b1 y b2) se presenta en la Figura 43.

**Tabla 19. Clasificación sismo-tectónica de la sismicidad para eventos del catálogo (sin eventos dependientes), según modelos de fuentes**

| Ambiente tectónico | N. eventos (Modelo b1) | N. eventos (Modelo b2) |
|---|---|---|
| Cortical | 9054 | 8991 |
| Interplaca | 311 | 365 |
| Intraplaca (Zona Benioff) | 760 | 790 |
| Profundos (Bucaramanga) | 3440 | 3415 |
| **Total** | **13565** | **13561** |

Fuente: autores

Se resalta que el esquema de clasificación de sismicidad adoptado se aplicó para la determinación del régimen sismotectónico de los eventos de la base de datos de movimientos fuertes presentados el Capítulo 3. La Figura 41 presenta resultados de la clasificación tectónica para eventos: a) corticales, b) subducción (interplaca, Benioff) y Nido de Bucaramanga.




a) Eventos corticales b) Eventos de subducción

**Figura 41. Clasificación sismotectónica de los eventos del catálogo (sin eventos dependientes): a) eventos corticales; b) eventos de subducción y profundos: interplaca (símbolo verde); intraplaca –zona Benioff (símbolo celeste); nido sísmico de Bucaramanga (símbolo azul oscuro)**

Fuente: autores

## 4.2 Árbol lógico de fuentes sísmicas adoptado para Colombia

Partiendo de los logros alcanzados en estudios previos (tales como García et ál., 1984; AIS-Uniandes-Ingeominas 1996; AIS 2009), en el presente estudio se proponen las siguientes alternativas (ver Figura 42) para contribuir a una mejor comprensión y modelación de fuentes sísmicas:

- *Fuentes superficiales*: Las fuentes superficiales se modelan considerando dos alternativas: (i) fuentes volumétricas tipo área (de sismicidad equiprobable); (ii) modelo compuesto de fallas activas y de sismicidad suavizada.
- *Fuentes interplaca en la subducción del pacífico*: se consideran dos alternativas de análisis: (i) modelo segmentado cuyo límite superior de sismicidad es de 40 km; (ii) modelo no segmentado cuyo límite superior de sismicidad es de 50 km.
- Fuentes en la zona Benioff (intraplaca): se consideran dos alternativas de geometría con límites superiores de sismicidad de 40 km y 50 km.
- *Fuentes profundas*: se considera sólo un modelo de fuentes para la sismicidad intraplaca del nido sísmico de Bucaramanga.

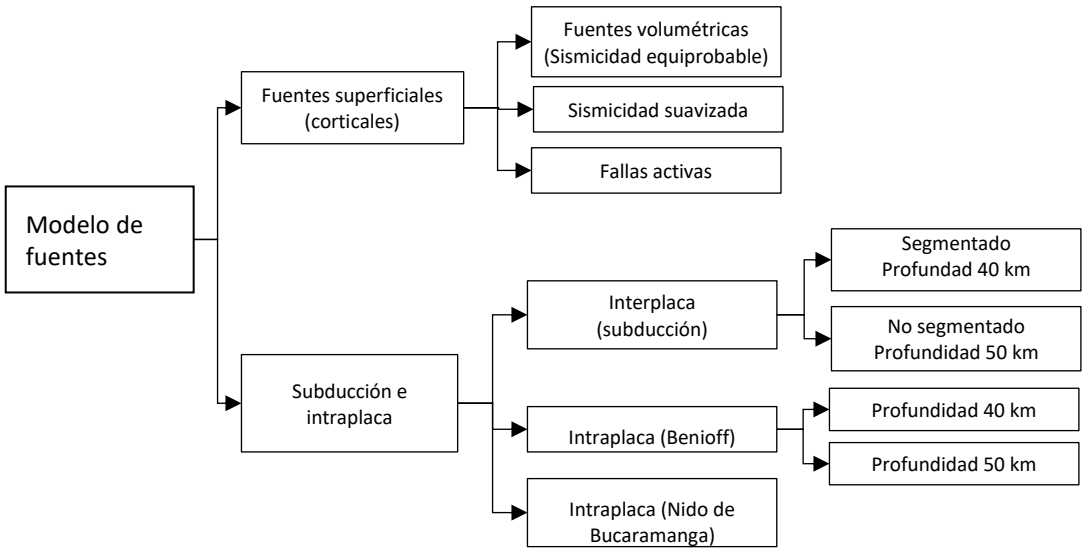



**Figura 42. Estructura del modelo según profundidad y tipo de fuentes sísmicas**

Fuente: autores

Con el fin de armonizar y consolidar los resultados de los diferentes enfoques y tipos de fuentes, en el presente estudio se elaboró un árbol lógico de fuentes sísmicas (ver Figura 43).

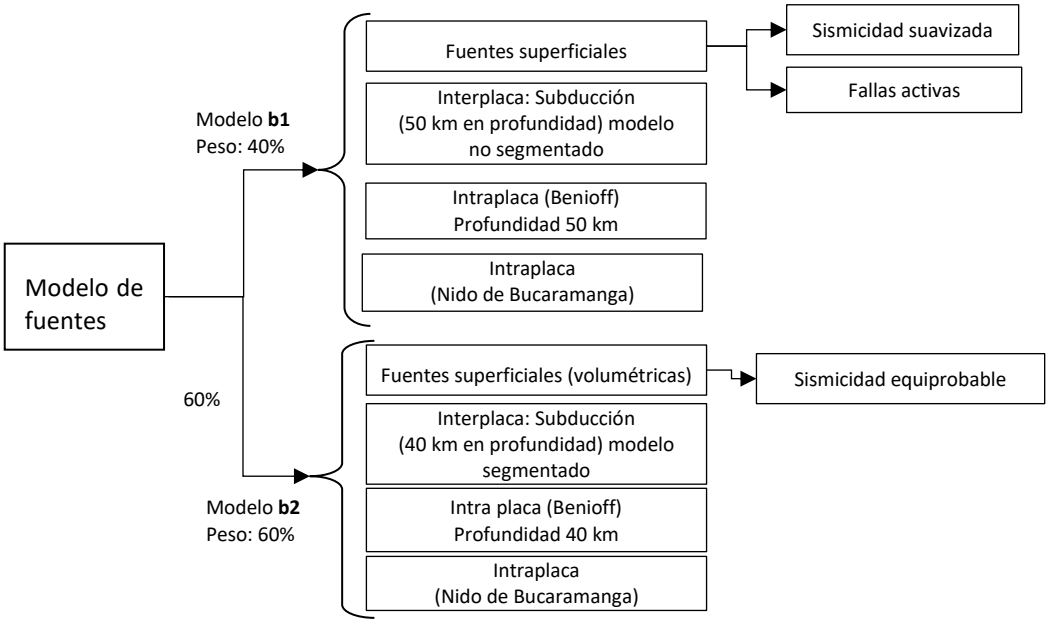



**Figura 43. Árbol lógico del modelo de fuentes sísmicas adoptado**

Fuente: autores

Las alternativas propuestas para la modelación de fuentes superficiales buscan atender incertidumbres epistémicas según el tipo de fuente y la distribución de los parámetros de sismicidad. Por otro lado, las alternativas propuestas para las fuentes interplaca y de la zona de Benioff buscan atender incertidumbres asociadas con la geometría de tales fuentes. Del presente análisis se resalta la consideración de variaciones de la profundidad y de los límites que las definen.

Respecto a los pesos asignado a los modelos de fuentes, en el presente estudio se considera que, para fuentes superficiales, la incertidumbre en la caracterización del modelo de fallas activas y de sismicidad suavizada es mayor que la del modelo de sismicidad equiprobable. Por lo tanto, se asigna un menor grado de creencia (un menor peso) al modelo de fallas activas y de sismicidad suavizada.

Por otro lado, para el proceso de subducción del pacífico, un modelo segmentado de fuentes representa un mayor detalle en la distribución geográfica de los parámetros de sismicidad y por lo tanto una descripción más detallada de la amenaza. Por esta razón se asigna un mayor grado de creencia (un mayor peso) al modelo segmentado.

## 4.3 Modelación de fuentes sísmicas

En las siguientes secciones se presentan detalles respecto a la caracterización de las fuentes consideradas en el modelo según ambientes tectónicos, así como de su implementación en el motor de cálculo OpenQuake.

### 4.3.1 Fuentes superficiales tipo área (volumétricas)

Las fuentes tipo área (volumétricas) se adoptan para describir la sismicidad en regiones amplias, en las cuales se considera que la sismicidad está igualmente distribuida en su interior. Para definir los límites de estas fuentes, en este estudio se consideran parámetros geológicos y tectónicos. A su vez, para caracterizar la sismicidad de estas fuentes se utiliza la información contenida en catálogos sísmicos. Mayores detalles sobre estos procedimientos se presentan a continuación.

#### 4.3.1.1 Definición de la geometría de fuentes superficiales – tipo área

De acuerdo con Ansari et ál. (2015), la incertidumbre en los modelos de fuentes sísmicas se debe principalmente a la definición de la geometría de las fuentes, así como a la definición de su sismicidad a partir del catálogo de eventos observados. Esta condición se hace más relevante teniendo en cuenta que los periodos de observación de sismos son relativamente cortos, que se cuenta con información difusa de los sismos y que existen dificultades para la identificación de fallas activas. Ante estas limitaciones, la definición de fuentes sísmicas puede ser subjetiva y estar determinada por el criterio del modelador.

Con el fin de reducir (en alguna medida) la subjetividad en la definición de la geometría de las fuentes, en el presente estudio se adoptó el procedimiento propuesto por Arcila et ál. (2017), en el cual se utiliza información tectónica, geológica y sismológica con el fin de tener una aproximación a los procesos dinámicos de la corteza terrestre que originan los sismos.

El procedimiento adoptado comprende las siguientes etapas: (i) análisis de información geológica y sísmica; (ii) georreferenciación de zonas y documentación de criterios; (iii) comprobación estadística y parametrización; (iv) presentación pública. La Figura 44 presenta un esquema de este procedimiento.

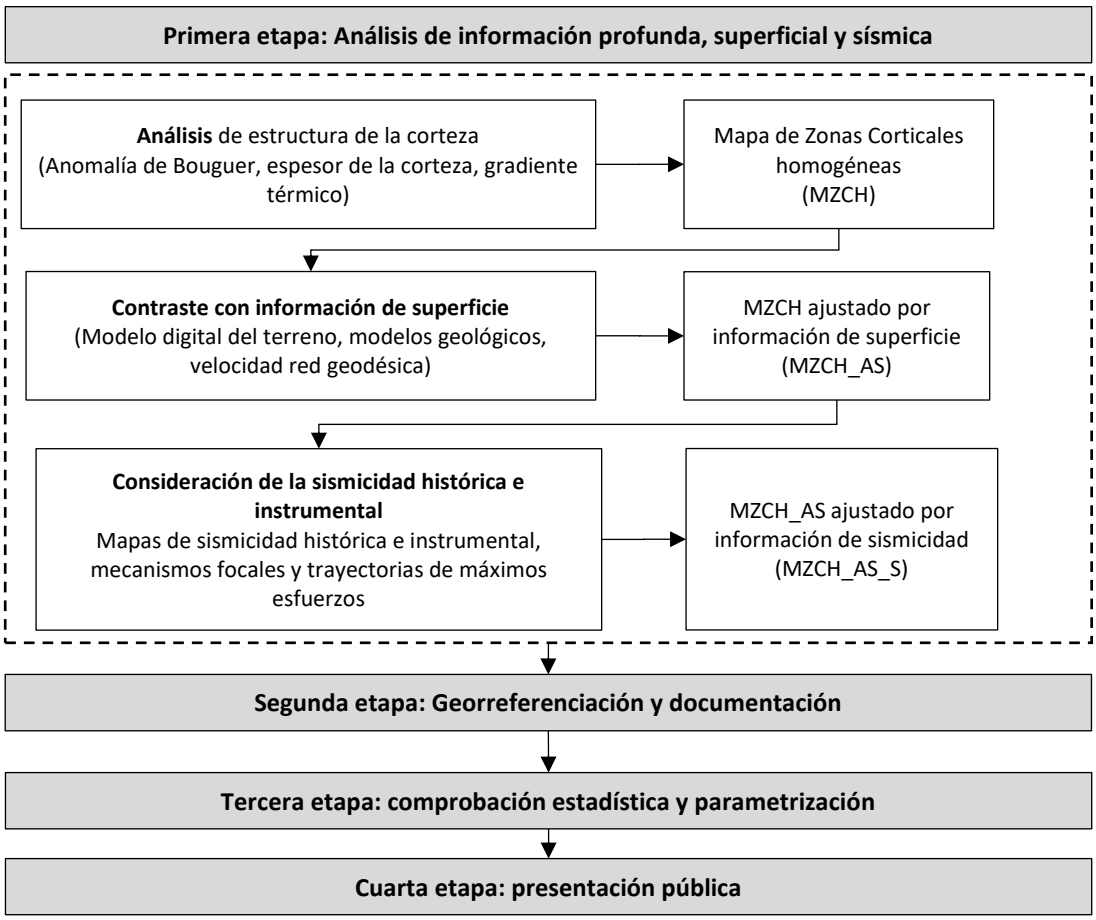



**Figura 44. Esquema del procedimiento para la definición de la geometría de fuentes sísmicas superficiales**

Fuente: autores

La metodología descrita para la definición de la geometría y caracterización de fuentes sísmicas fue aplicada en Colombia, mediante un trabajo conjunto entre investigadores del SGC y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Como resultado se obtuvieron 30 áreas sismogénicas (independientes) que cubren todo el territorio (ver Figura 45).

La geometría de tales fuentes se definió mediante polígonos (o volúmenes) delineando regiones con un comportamiento homogéneo de la sismicidad desde un punto de vista espacio-temporal. Sobre el procedimiento (adoptado para definir la geometría de fuentes superficiales) se resalta que también puede considerarse como una referencia para establecer los límites geométricos de las zonas de subducción.

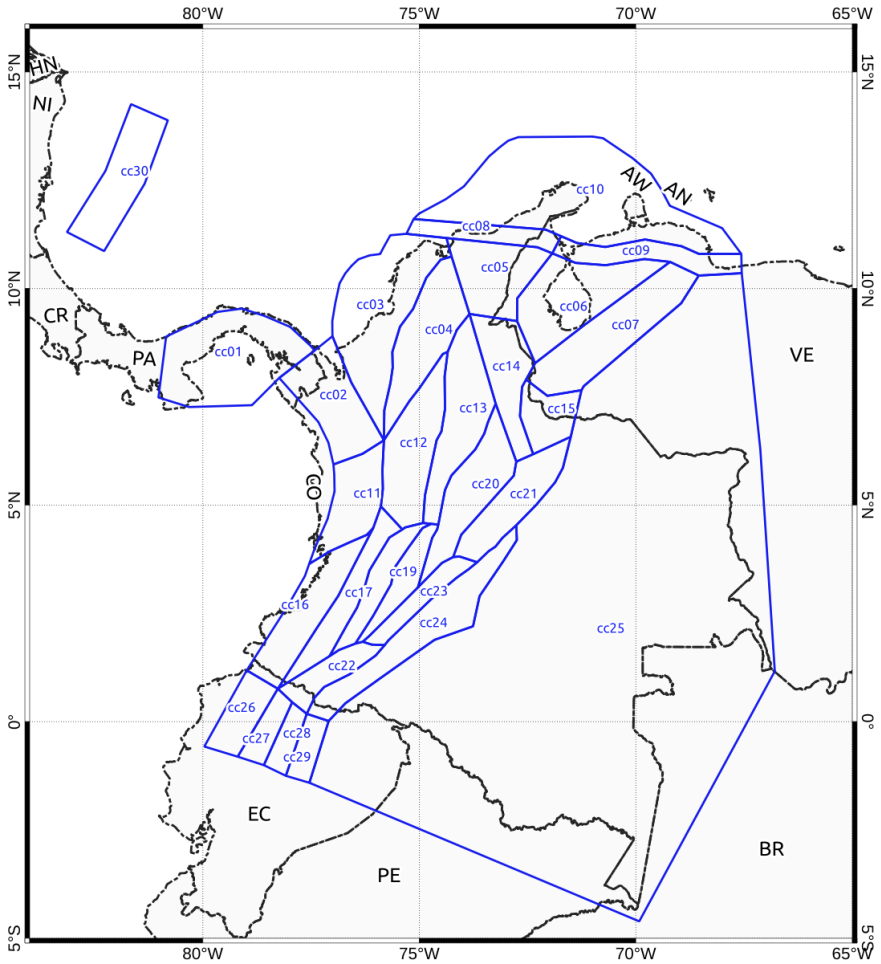



**Figura 45. Modelo de fuentes corticales (tipo área) propuesto por el SGC-IGME**

Fuente: autores

La Tabla 20 presenta un ejemplo de una tabla de resumen de las características, parámetros obtenidos y criterios adoptados para la caracterización de cada fuente.

**Tabla 20. Ejemplo descripción de una zona sismogénica**

| Zona | Corteza y esfuerzos | Superficie y fallas activas | Sismicidad | Parámetros sísmicos | Criterios, alternativas y comentarios |
|---|---|---|---|---|---|
| Cordillera Oriental y Borde Llanero | Corteza continental engrosada<br>H= 40-50 km<br>GT= datos disponibles poco representativos<br>Shmáx= E-W a NW-SE<br>Régimen: Compresivo | Vertiente oriental de la Cordillera y franja de los Llanos, donde se infiere continuidad de las estructuras compresivas.<br>Cabalgamientos calificados como activos en el Cuaternario a lo largo del frente montañoso, tanto en el propio borde, Llanos y algunos kilómetros hacia el interior de la Cordillera: Sistema de Guaicaramo.<br>Tectónica predominante: Cabalgamientos. | Tamaño de la muestra sísmica, aparentemente abundante.<br>Distribución de la muestra bastante homogénea, si bien parece que hacia el NE la densidad de epicentros aumenta.<br>Existen varios registros con I=VII ó Mw≥5,5. Uno de 6,7 (1917).<br>Máxima Mw registrada en el CSI= 6,7<br>Terremotos significativos: 1917, 1995 | λ(4,0)= 3,64<br>b= 0,9<br>Mwmáx = 6,8±0,3<br>Mecanismo rotura predominante: Inverso | Criterio: Comprender el frente activo de la Cordillera Oriental y su extensión por la franja adyacente del Borde Llanero. Esta zona presenta un contrastado aumento de sismicidad en relación con el interior de la cordillera como con los Llanos. En cuanto a corteza, se observa gradiente gravimétrico positivo hacia el interior de los Llanos mostrando el adelgazamiento de la cadena.<br>Borde NW: Representado por disminución de la sismicidad, y el paso a la parte central de la cordillera de corteza engrosada.<br>Borde SE: Representado por la disminución de epicentros y de estructuras compresivas cartografiadas, en su paso hacia la corteza adelgazada de los Llanos.<br>Borde S: Representado por la aparición de la zona de deformación de la Falla de Algeciras.<br>Borde N: Representado por aparición de estructuras norteadas, deformaciones relacionadas con la zona de falla de Boconó, y un aumento relativo de la sismicidad.<br>Alternativas: ¿Zona de indentación Boconó y escapes laterales de la cordillera? |

Fuente: autores

#### 4.3.1.2 Estimación de parámetros de sismicidad para fuentes tipo área

Uno de los principales supuestos del modelo de amenaza sísmica adoptado en el presente estudio es que las rupturas son eventos independientes, de tal manera que la ocurrencia de un sismo no influye en las probabilidades de ocurrencia de otro. De esta manera, las tasas de ocurrencia de sismos no varían con el tiempo.

En el presente estudio, la caracterización de la sismicidad de las fuentes tipo área se determina mediante una ley de recurrencia de Gutenberg – Ricther (1954), en la cual se considera que los sismos siguen una distribución exponencial. Bajo esta ley de recurrencia, el número de eventos de magnitudes iguales o superiores a *m* ($N_m$), en una determinada ventana de observación, puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$Log_{10}(N_m) = a - bm \qquad \text{Ecuación 4.1}$$

Los parámetros a y b de dicha distribución se denominan parámetros de sismicidad y pueden estimarse a partir del análisis estadístico del catálogo de eventos (sin eventos dependientes), considerando únicamente los sismos pertenecientes a la fuente de interés.

En términos generales, el parámetro *a* representa la tasa general de actividad (recurrencia) de eventos en la zona. Por su parte, el parámetro *b* está relacionado con la sismotectónica de la región y se estima considerando el rango de magnitudes y la magnitud mínima observada en el catálogo.

Los parámetros *a* y *b* fueron obtenidos usando el método de máxima verosimilitud propuesto por Weichert (1980) disponible en la herramienta HMTK (Weatherill, 2014). La Figura 46 presenta un ejemplo de la distribución de recurrencia de magnitudes obtenida para la Fuente CC_10, la cual corresponde a la zona norte del departamento de La Guajira.

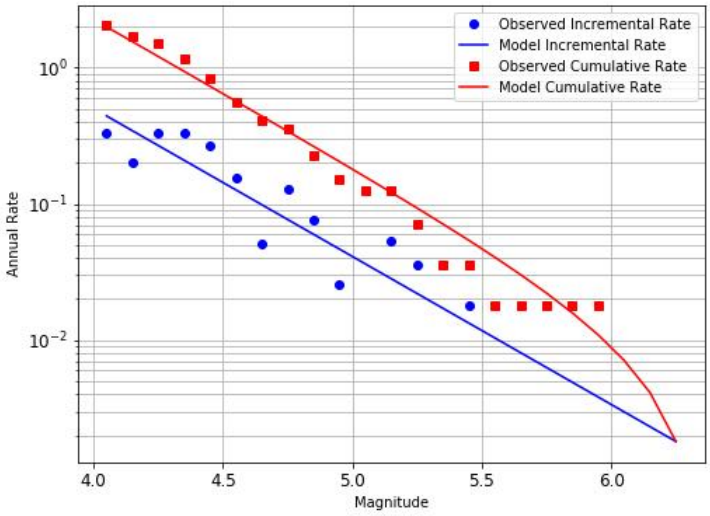



**Figura 46. Ejemplo de distribución Gutenberg Richter doblemente truncada**

Fuente: autores

La Tabla 21 presenta un resumen de los parámetros principales para cada una de las fuentes sísmicas. En esta Tabla, *Id* representa un identificador de la fuente sísmica; el campo *Nombre* corresponde al nombre de la fuente sísmica, referido a la región geográfica donde la misma está localizada o la componente tectónica predominante (p. ej. Cratón). Por su parte, los campos *a* y *b* representan los parámetros de la distribución magnitud frecuencia. Por último, los campos *Mmin* y *Mmax* representan la magnitud (Mw) mínima y máxima, respectivamente. En el Anexo C se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia para cada fuente.

**Tabla 21. Principales parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas pertenecientes al modelo zonificado de fuentes corticales**

| Id | Nombre | a | b | Mmin | Mmax |
|---|---|---|---|---|---|
| cc01 | Oriente Panamá | 3.82 | 1.00 | 5.0 | 7.2 |
| cc02 | Pacífico Norte (Darién) | 4.62 | 1.00 | 5.0 | 7.4 |
| cc03 | Sábanas costeñas | 3.61 | 0.94 | 5.0 | 6.8 |
| cc04 | Ciénagas del Caribe | 3.45 | 0.83 | 5.0 | 6.5 |
| cc05 | Perijá - Sierra Nevada | 3.48 | 0.92 | 5.0 | 6.5 |
| cc06 | Depresión de Maracaibo | 1.59 | 0.43 | 5.0 | 6.5 |
| cc07 | Andes de Mérida | 4.15 | 0.90 | 5.0 | 7.9 |
| cc08 | Transversal del Caribe (Oca) | 2.75 | 0.80 | 5.0 | 6.7 |
| cc09 | Transversal de Falcón | 3.12 | 0.79 | 5.0 | 6.7 |
| cc10 | Guajira - Paraguaná | 4.78 | 1.10 | 5.0 | 6.7 |
| cc11 | Pacifico Central | 4.23 | 1.02 | 5.0 | 6.5 |

| Id | Nombre | a | b | Mmin | Mmax |
|---|---|---|---|---|---|
| cc12 | Norte Cordillera Central | 3.66 | 0.92 | 5.0 | 6.5 |
| cc13 | Magdalena Medio | 3.35 | 0.78 | 5.0 | 6.5 |
| cc14 | Norte Santander | 4.18 | 1.06 | 5.0 | 6.5 |
| cc15 | Cocuy | 3.72 | 0.86 | 5.0 | 7.5 |
| cc16 | Pacífico Sur | 2.82 | 0.74 | 5.0 | 6.8 |
| cc17 | Cauca - Patía | 2.05 | 0.61 | 5.0 | 6.8 |
| cc18 | Central Cordillera Central | 2.55 | 0.70 | 5.0 | 7.1 |
| cc19 | Valle Alto del Magdalena | 3.65 | 1.09 | 5.0 | 6.5 |
| cc20 | Altiplano Cundiboyacense | 3.14 | 0.83 | 5.0 | 6.8 |
| cc21 | Piedemonte Orinoquía | 4.16 | 0.97 | 5.0 | 6.8 |
| cc22 | Zona Andina Nariñense | 2.63 | 0.69 | 5.0 | 7.0 |
| cc23 | Sur Cordillera Oriental | 4.75 | 1.17 | 5.0 | 7.0 |
| cc24 | Piedemonte Amazonía | 3.76 | 1.03 | 5.0 | 7.4 |
| c25 | Cratón | 3.55 | 0.93 | 5.0 | 6.6 |
| c26 | Pacífico Ecuatoriano | 5.13 | 1.27 | 5.0 | 7.5 |
| cc27 | Sierra occidental ecuatoriana | 5.66 | 1.34 | 5.0 | 7.6 |
| cc28 | Sierra oriental ecuatoriana | 5.22 | 1.22 | 5.0 | 7.4 |
| cc29 | Piedemonte Ecuatoriano | 4.91 | 1.23 | 5.0 | 6.7 |
| cc30 | Insular San Andrés | 1.74 | 0.54 | 5.0 | 6.5 |

Fuente: autores

#### 4.3.1.3 Modelación de las fuentes tipo área

Para modelar las fuentes tipo área en el motor de cálculo OpenQuake se requieren los siguientes insumos:

(i) Polígonos que definen los límites de la fuente (ver sección 4.3.1.1);
(ii) Límites inferiores y superiores de profundidad de ocurrencia de sismos;
(iii) Leyes de distribución de frecuencia de magnitudes (ver sección 4.3.1.2);
(iv) Relaciones de escala de magnitudes y razones de aspecto de la ruptura;
(v) Geometría de las rupturas en términos de los ángulos de rumbo (strike), buzamiento (dip), deslizamiento (rake).

La Figura 47 presenta un ejemplo de la modelación de una fuente tipo área en OpenQuake Engine.

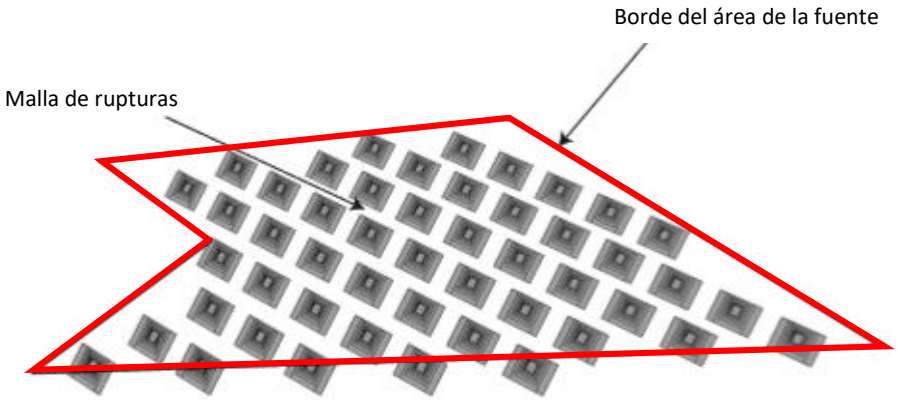



**Figura 47. Ejemplo de fuentes tipo área**

Fuente: Pagani et ál. (2014)

A continuación, se describen principales supuestos y consideraciones en cuanto a los parámetros que caracterizan las fuentes tipo área del modelo de fuentes corticales.

a) **Magnitud mínima**: Fijada arbitrariamente a $M_w$=5.0.
b) **Magnitud máxima**: obtenida como el valor de magnitud máxima observada ($M_w$) incrementada de 0.3 unidades de magnitud. Si la magnitud máxima obtenida para una zona es menor que 6.5, la magnitud máxima asignada fue 6.5.
c) **Espesor sismogenético**: los límites superior e inferior de la capa sismogénica fueron definidos a partir de un análisis estadístico de la ocurrencia de terremotos instrumentales y la profundidad de la discontinuidad de Mohorovičić.
d) **Distribución de eventos en profundidad**: A partir de histogramas de eventos en profundidad, fue definida la probabilidad de ocurrencia para tres profundidades definidas a priori (5, 20, 35 km). En la Figura 48 se presenta un ejemplo de los eventos según rangos de profundidad.

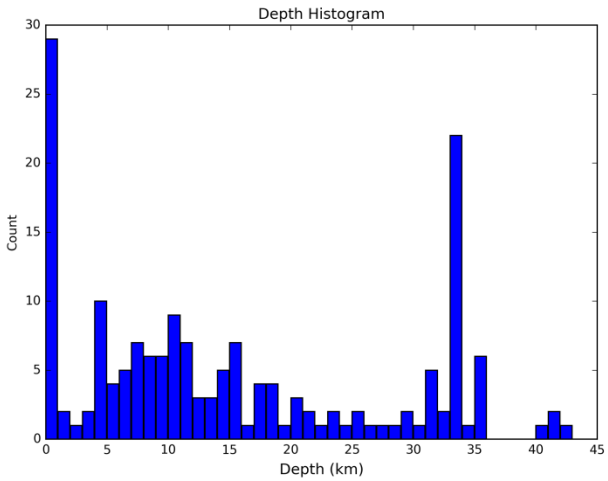



**Figura 48. Ejemplo de histogramas de eventos en profundidad**

Fuente: autores

Sobre la distribución en profundidad, vale la pena resaltar que debido a las limitaciones de los modelos de velocidades utilizados para la localización de los sismos, es posible encontrar picos a profundidades fijadas (tal como se presenta en la Figura 48 para 0 y 33 km), las cuales pueden corresponder a soluciones por defecto, en los casos en los cuales no es posible resolver con precisión la localización de los sismos.

e) **Tipo de ruptura predominante y su orientación:** Obtenida a partir del análisis de los mecanismos focales de los eventos, así como la orientación preferencial y la cinemática de las fallas dentro del área. La Figura 49 presenta un ejemplo del análisis de mecanismos focales y de la orientación preferencial, considerando clasificaciones sugeridas por Kaverina et ál. (1996), así como una clasificación simplificada.

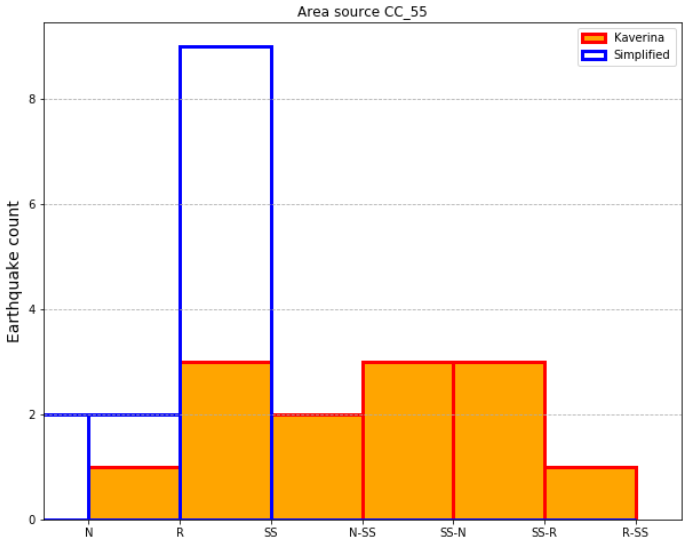



**Figura 49. Ejemplos de análisis de mecanismos focales y orientación preferencial y cinemática**

Fuente: autores

f) **Actividad sísmica**: Representada por una distribución Gutenberg-Richter (*Gutenberg - Richter, 1954)* doblemente truncada, asumiendo un intervalo de magnitud de 0.1, +una magnitud mínima ($M_w$ 4.0) y máxima (variable según la potencialidad de la zona).

La Figura 50 y la Figura 51 presentan el parámetro *a* y parámetro *b* (respectivamente) para las fuentes corticales tipo área. De estas figuras se resaltan los siguientes sectores: el sur del departamento de Nariño, en la frontera con Ecuador; el norte del departamento de la Guajira; el borde de la cordillera oriental, sobre los departamentos de Huila y Meta; así como el noroccidente del departamento del Chocó.

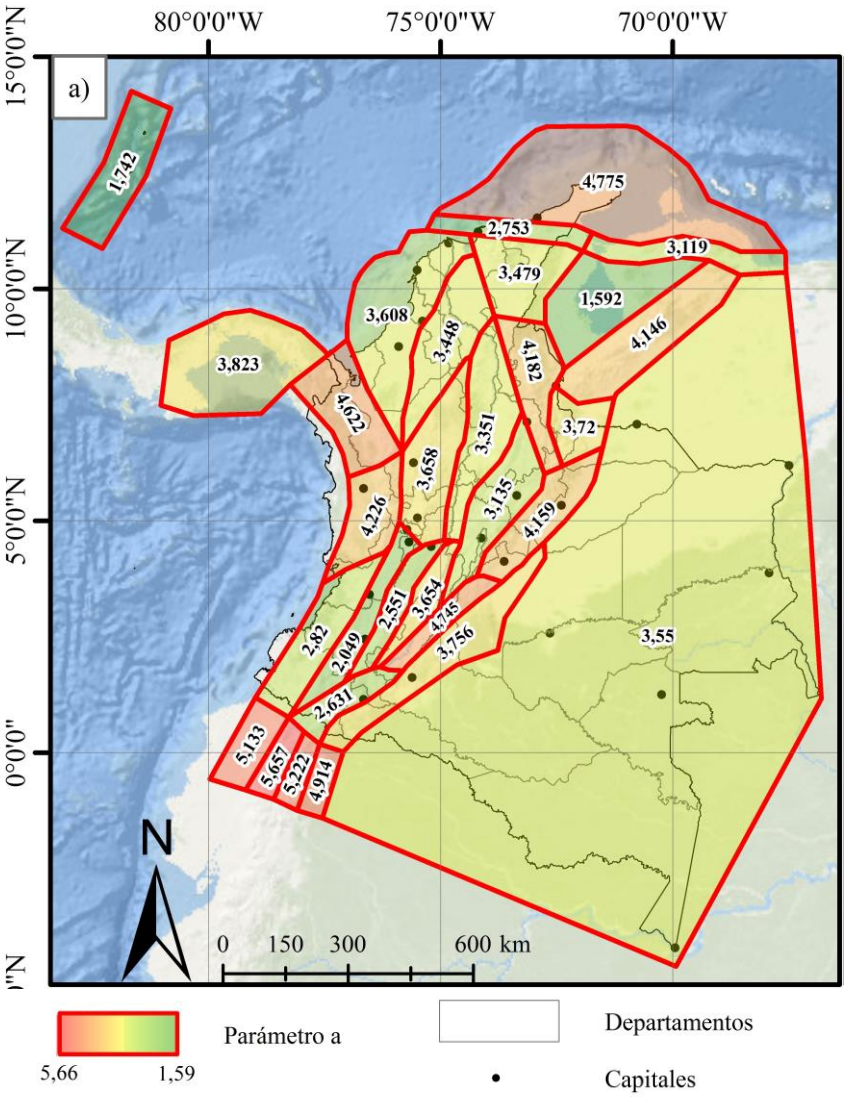



**Figura 50. Parámetro a Fuentes corticales tipo área**

Fuente: autores

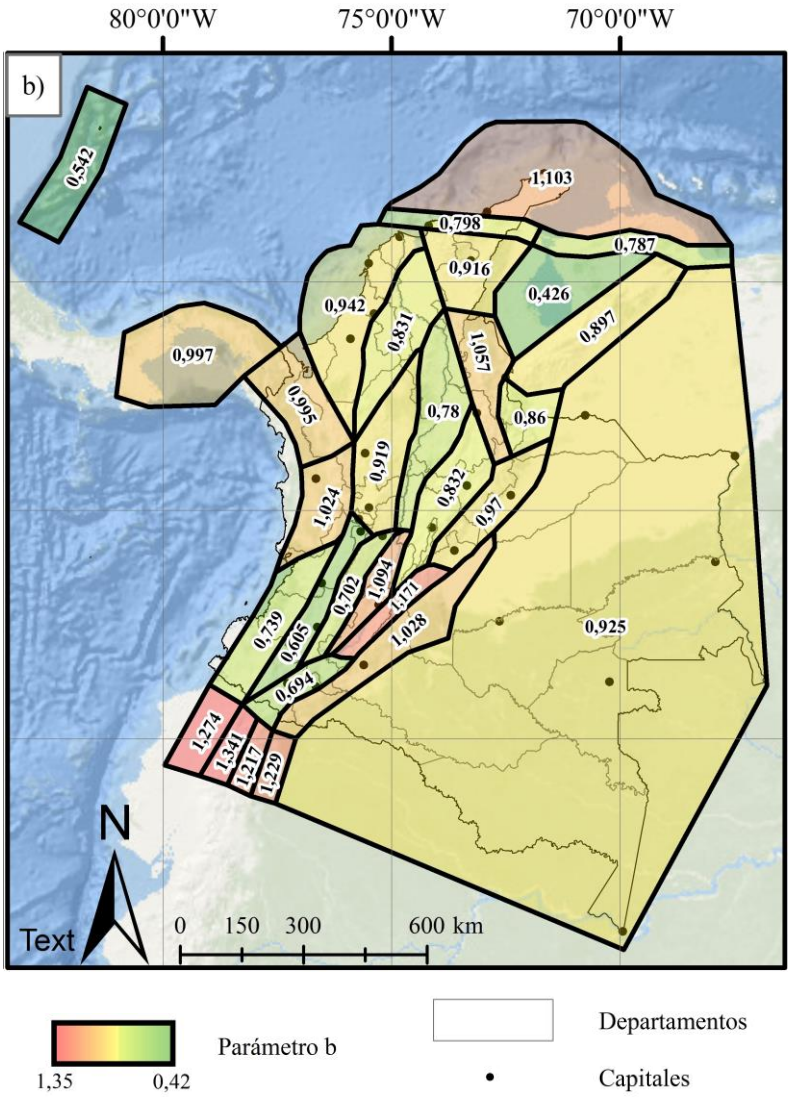



**Figura 51. Parámetro b Fuentes corticales tipo área**

Fuente: autores

La Figura 52 presenta la magnitud máxima asignada a cada fuente. De esta Figura se encuentra que los mayores valores se encuentran al nororiente en la frontera con Venezuela (en zonas de Norte de Santander, Arauca); al noroccidente del departamento de Chocó; los departamentos de Huila y Meta (sobre la cordillera oriental); así como al sur occidente, en la frontera con Ecuador.

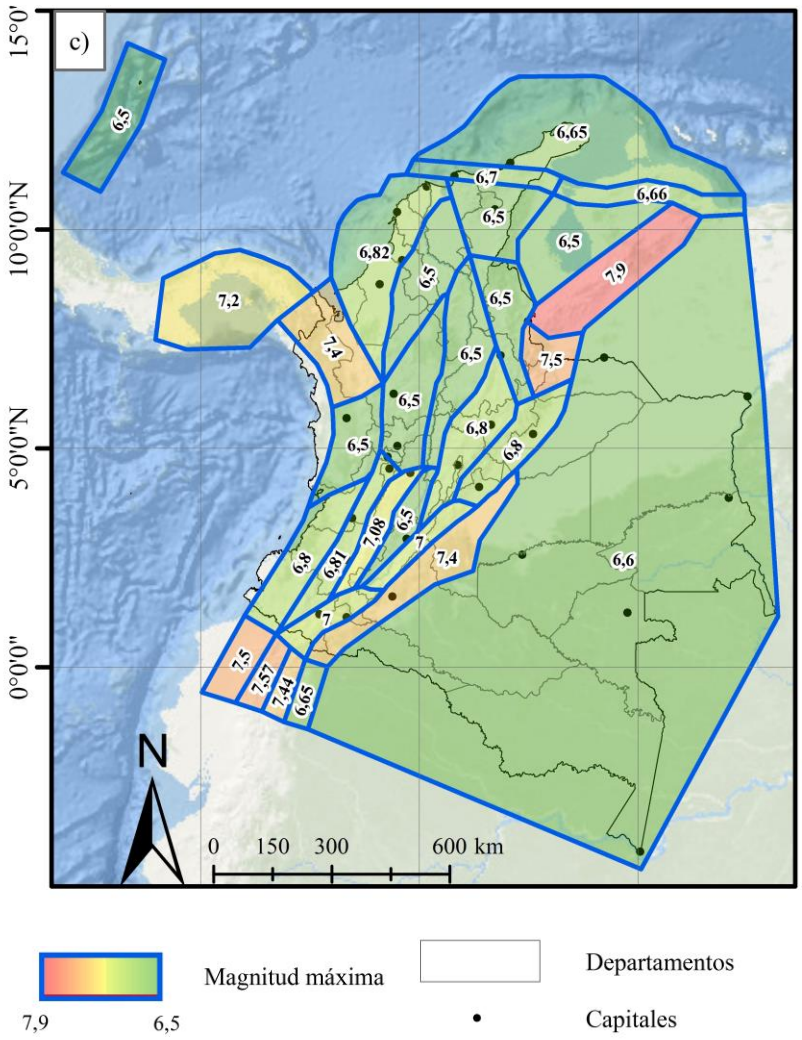



**Figura 52. Magnitud máxima. Fuentes corticales (tipo área)**

Fuente: autores

### 4.3.2 Modelo de sismicidad suavizada y de fuentes tipo falla

En este modelo se integra un análisis de sismicidad suavizada con un modelo geo-tectónico de fallas activas mediante un procedimiento que pretende minimizar un conteo doble de la sismicidad en la región donde las fuentes (tipo área/grid y falla) se superponen geográficamente.

En la Figura 53, los polígonos azules representan macro-zonas al interior de las cuales se lleva a cabo un análisis de sismicidad suavizada, a excepción del polígono identificado con el ID c07, en el cual se consideró un área fuente (como la descrita en la sección 4.3.1). Por otro lado, las líneas rojas son las trazas de las fuentes sísmicas tipo falla activa,

mientras que los polígonos anaranjados (fallas 3D) representan la proyección superficial de la falla. A continuación, se presentan detalles respecto a la modelación de estos tipos de fuentes.

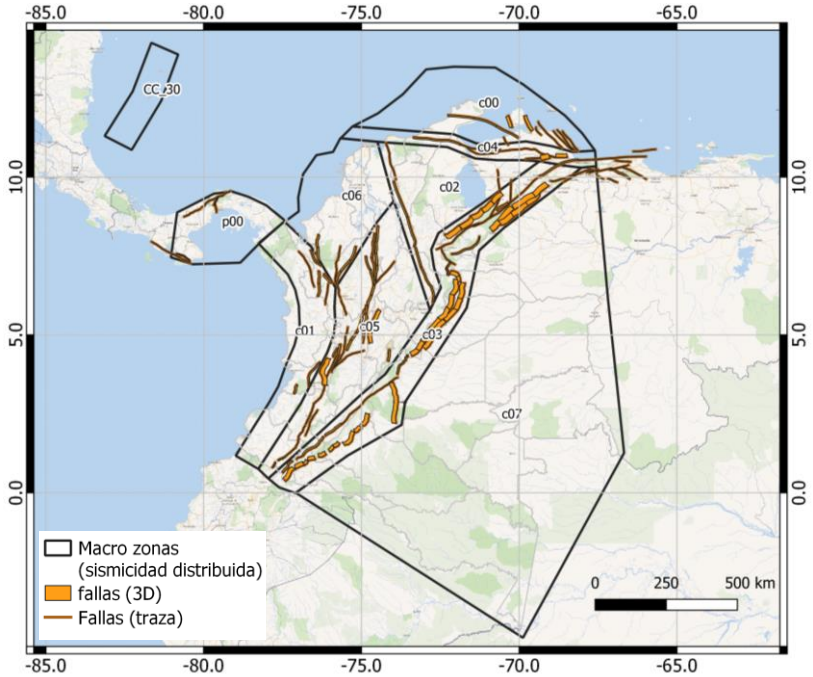



**Figura 53. Modelo de fuentes corticales considerando fuentes tipo falla y modelos de sismicidad distribuida**

Fuente: autores

Sobre las macro zonas definidas, se resalta que para la modelación de San Andrés y Providencia se utiliza una fuente idéntica a la establecida en el modelo de sismicidad equiprobable.

#### 4.3.2.1 Modelo de sismicidad suavizada

Teniendo en cuenta que para la construcción de modelos zonificados pueden existir diferentes criterios e incertidumbres en la definición de límites y geometrías de fuentes sísmicas, los modelos de sismicidad suavizada representan una alternativa basada principalmente en el catálogo de eventos. Bajo este enfoque se establece una malla regular para realizar, en cada celda, un conteo de eventos de magnitudes iguales o superiores a determinados rangos de magnitudes, considerando intervalos de 0.1 Mw.

Estos valores son posteriormente ajustados para obtener valores suavizados en el territorio. Estos valores son usados para estimar para cada sitio de interés, tasas anuales de ocurrencia de sismos a ciertas distancias y magnitudes. Detalles de la estimación de la amenaza sísmica bajo modelos suavizados se encuentran en Frankel (1995) y Woo

(1996). En Monelli et ál. (2014) se presentan procesos de implementación de este análisis en el motor de cálculo OpenQuake.

Para este modelo se definieron y caracterizaron nueve macro-zonas con un ambiente sismotectónico similar. La caracterización de las macro-zonas se realiza del mismo modo que en el modelo de fuentes tipo área (ver Figura 54). La Tabla 22 presenta un resumen de los parámetros principales para cada una de las macro-zonas consideradas en el modelo suavizado. En el Anexo D se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia para cada una de ellas.

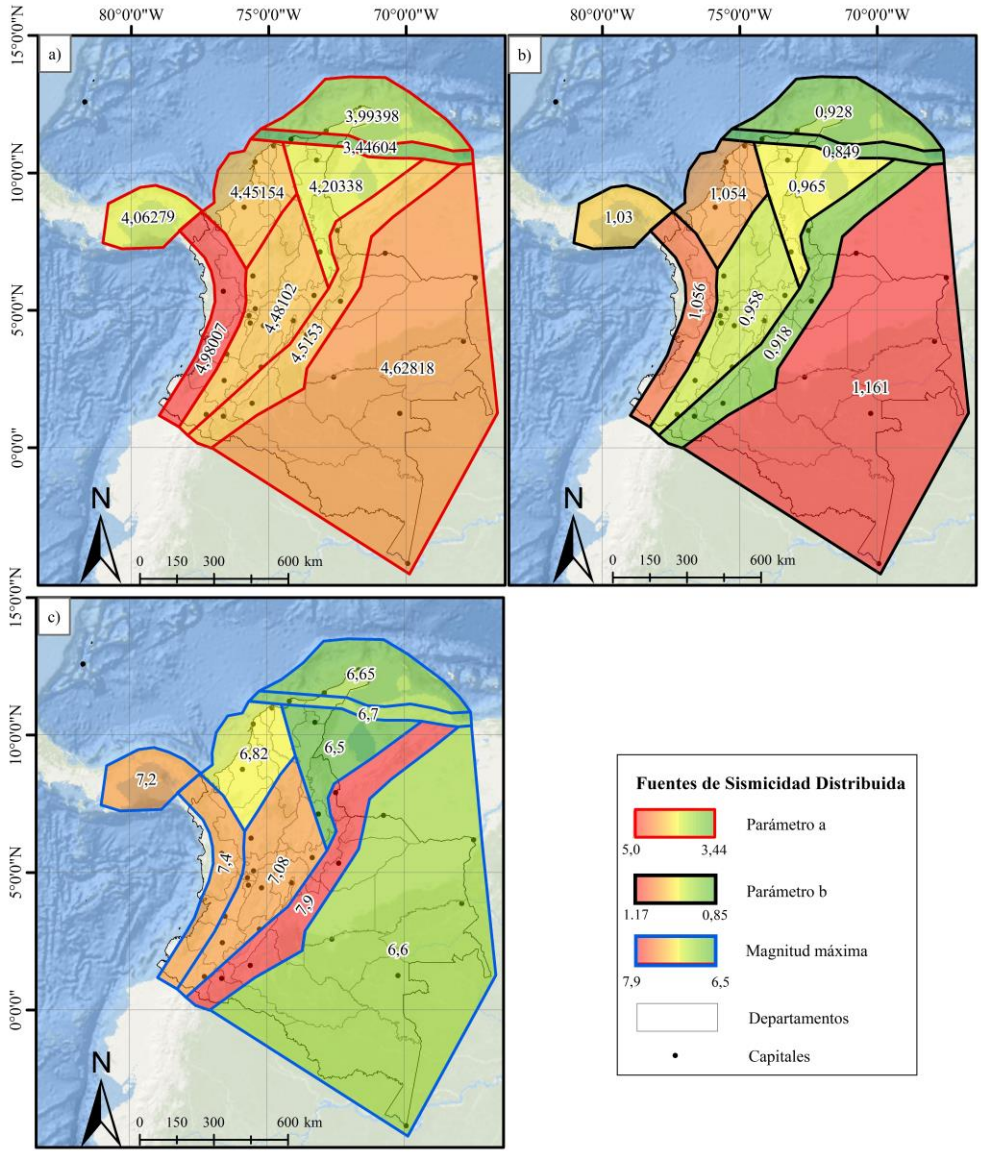



**Figura 54. Parámetros de sismicidad de macro-zonas consideradas para el modelo de sismicidad suavizada**

Fuente: autores

**Tabla 22. Parámetros principales de las macro zonas consideradas para el modelo de sismicidad distribuida (tipo kernel)**

| Id | Nombre | a | b | Mmin | Mmax |
|---|---|---|---|---|---|
| p00 | Panamá | 4.06 | 1.03 | 5.0 | 7.2 |
| c00 | Guajira - Paraguaná | 3.99 | 0.93 | 5.0 | 6.7 |
| c01 | Pacífica | 4.98 | 1.06 | 5.0 | 7.4 |
| c04 | Oca - Falcon | 3.45 | 0.85 | 5.0 | 6.7 |
| c06 | Caribe | 4.45 | 1.05 | 5.0 | 6.8 |
| c05 | Andina | 4.48 | 0.96 | 5.0 | 7.1 |
| c02 | Nororiental | 4.20 | 0.97 | 5.0 | 6.5 |
| c03 | Piedemonte oriental | 4.52 | 0.92 | 5.0 | 7.9 |
| c07 | Cratón | 4.63 | 1.16 | 5.0 | 6.6 |
| CC08 | San Andrés | 1.74 | 0.54 | 5.0 | 6.5 |

Fuente: autores

Para cada macro-zona se establece un subcatálogo de eventos principales. A su vez, se definen fuentes puntuales las cuales fueron distribuidas en una malla espaciada 0.1º en cada una de las macro-zonas.

La transformación del modelo tipo área a tipo fuente puntual (tipo kernel –suavizado) se realiza aplicando un filtro gaussiano al sub-catálogo de sismos principales de cada una de las macro-zonas. Posteriormente, se calcula la fracción de la tasa de ocurrencia total que puede ser referida espacialmente al nodo/localización donde se encuentra cada fuente puntual.

Para una determinada fuente puntual, la tasa de ocurrencia está condicionada por la distribución de magnitud-frecuencia obtenida para la macro-zona, compartiendo el mismo valor de *b* y tasas de ocurrencia producto del filtraje espacial gaussiano.

Para elaborar el modelo de sismicidad suavizada se utilizaron herramientas creadas por la fundación GEM para este propósito, obteniendo un conjunto de fuentes puntuales. Estas fuentes se definen a partir de: las coordenadas del punto; los límites inferiores y superiores de profundidad de ocurrencia de sismos; relaciones de escala de magnitudes; razones de aspecto de la ruptura; tasas de ocurrencia de eventos según magnitudes; y, la geometría de las rupturas, descrita en términos de los ángulos de rumbo (strike), buzamiento (dip), deslizamiento (rake). La Figura 55 presenta un esquema de las fuentes puntuales modeladas en el motor de cálculo OpenQuake.

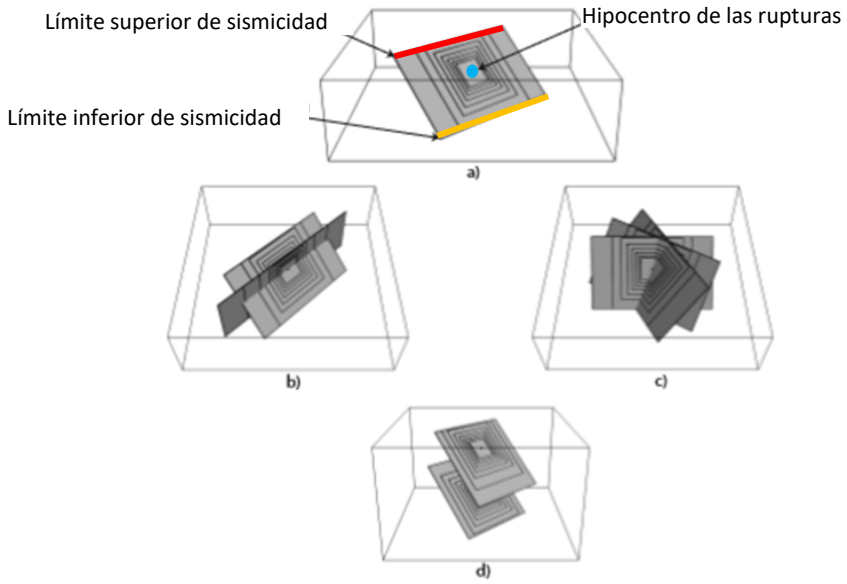



**Figura 55. Ejemplo de fuentes puntuales (a) diferencias según relaciones de escala y de aspecto; (b) diferencias según buzamiento, (c) rumbo] y (d) profundidades hipocentrales**

Fuente: adoptado de Pagani et ál. (2014)

Al comparar los parámetros de las macro-zonas (ver Figura 54) con los parámetros asignados a las áreas fuente del modelo de sismicidad equiprobable (ver Figura 50, Figura 51 y Figura 52), se observa que las macro-zonas adoptan valores cercanos a los máximos de las áreas fuente que abarcan.

Por ejemplo, para la costa pacífica, el modelo de sismicidad equiprobable tiene fuentes con magnitudes máximas de 7.4 Mw para el norte de Chocó (ID CC02, Tabla 21) y de 7.5 Mw al sur de Nariño (ID CC26, Tabla 21). En el modelo de sismicidad distribuida, el pacífico está representado en una macro zona (ID C01, Tabla 22), cuya magnitud máxima es 7.4. De esta manera, los parámetros de las macro-zonas pueden representar una mayor sismicidad. Estos valores se armonizaron con la actividad sísmica de fallas activas, tal como se describe en la siguiente sección.

#### 4.3.2.2 Caracterización de fallas activas

Las fallas activas fueron determinadas a partir de un enfoque geo-tectónico. De esta manera, para la caracterización de la actividad sísmica de estas fuentes no se utiliza información del catálogo de sismos.

En la modelación de fuentes tipo falla se supone que los eventos ocurren en el entorno de la misma. Ante limitaciones en el conocimiento de la geometría (en superficie y en

profundidad), se optó por un tipo de falla simple (según la nomenclatura del motor de cálculo OpenQuake), que se describe a partir de los siguientes parámetros: traza de la falla en superficie; una distribución de frecuencia de magnitudes; una relación de escala de magnitudes; geometría de las rupturas en términos de los ángulos de rumbo (strike), buzamiento (dip), deslizamiento (rake); límites superior e inferior de la profundidad de la capa sismo activa.

En el motor de cálculo OpenQuake, las rupturas se obtienen al trasladar la traza de la falla (en superficie) al límite inferior de profundidad de las rupturas con una inclinación de acuerdo con el ángulo de buzamiento y azimut. Para este tipo de fuente, el límite inferior y superior delimitan la región donde pueden ocurrir rupturas en la falla (Pagani et ál. 2014). La Figura 56 presenta un ejemplo de la fuente tipo falla con ruptura flotante, de acuerdo con la modelación realizada en OpenQuake.

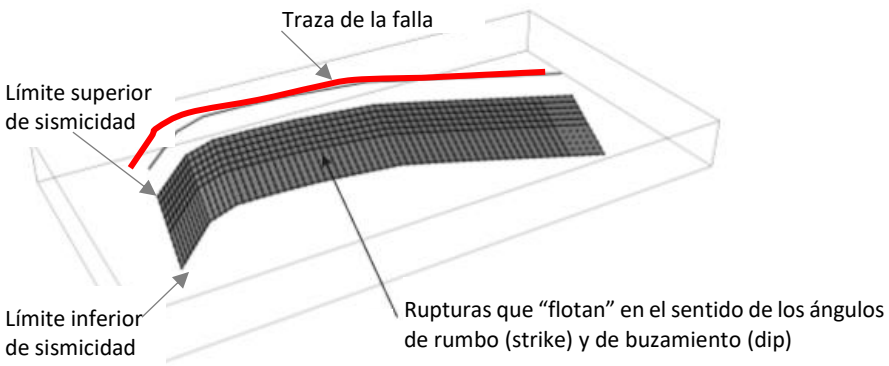



**Figura 56. Ejemplo de fuente tipo falla con rupturas flotantes**

Fuente adoptado de Pagani et ál. (2014)

A continuación, se presentan los parámetros adoptados para la definición de las fallas activas:

a) **Magnitud mínima**: Fijada en $M_w$=6.5, asumiendo que sólo para eventos con esta magnitud (o mayores) es posible reconocer que la ruptura llega a la superficie.
b) **Magnitud máxima**: Obtenida usando los parámetros geométricos que caracterizan la falla (o segmento de ella) y la función de escala propuesta por Leonard (2010). Si la magnitud máxima obtenida es inferior a la magnitud mínima, la falla no viene considerada como fuente sísmica.
c) **Función de escala entre la magnitud y el área de ruptura**: Leonard (2010).
d) **Espesor sismogenético**: El límite superior es fijado arbitrariamente a 0 km de profundidad, suponiendo que las rupturas para eventos con $M_w$≥6.5 son

reconocidas en la superficie. El límite inferior varia teniendo en cuenta las dimensiones de la falla (o segmento de ella considerado) y su cinemática (ver detalles en Leonard, 2010).

e) **Actividad sísmica**: Representada por una distribución Gutenberg doblemente truncada, asumiendo un intervalo de magnitud de 0.1, una magnitud mínima ($M_w$6.5) y máxima obtenida como se explicó anteriormente.
En este caso, la actividad sísmica se calcula usando la información geológica y cinemática contenida en la base de fallas activas y no en forma directa del catálogo como en el caso de las fuentes tipo área (o de sismicidad distribuida).

Para el análisis de la actividad sísmica se utiliza la metodología propuesta por Anderson y Luco (1983), en la cual se supone que es posible encontrar un balance entre la productividad de la falla (número de terremotos promedio entre la magnitud mínima y máxima) y la tasa de liberación de momento total, representado por la tasa de deslizamiento anual.
El valor del parámetro *b* se fijó a priori como el valor obtenido en la macro-zona (fuente tipo área) a la que pertenece la falla. Por otro lado, el valor del parámetro *a* se ajustó de modo que la tasa de liberación de momento (total) equivale a la tasa de acumulación del momento sísmico. El modelo de recurrencia considerado fue el modelo exponencial propuesto por Youngs y Coppersmith (1985).

La Figura 57 y la Figura 58 presentan ejemplos de distribuciones de recurrencia de magnitudes de fallas pertenecientes a las macro-zonas C02 y C03, respectivamente. En estas figuras, las líneas rojas punteadas corresponden a la distribución de recurrencia de magnitudes de la macro-zona; las líneas amarillas a las distribuciones individuales de cada falla y la azul corresponde a la suma de las distribuciones de las fallas.

En la Figura 57 se observa que la distribución de magnitudes de la macro-zona C02 tiene una magnitud máxima de 6.5 Mw. Dicha distribución se complementa con la suma de las distribuciones de magnitudes de las fallas, de tal manera que se puede tener una evaluación de la amenaza sísmica en un rango de magnitudes superiores a 6.5 Mw.

En la Figura 58 se observa que la macro-zona C03 tiene una distribución de magnitudes con magnitud máxima superior a 7.5 Mw. En esta Figura se observa un buen ajuste entre la distribución de magnitudes de la macro-zona y la suma de distribuciones individuales de fallas pertenecientes a dicha macro-zona.

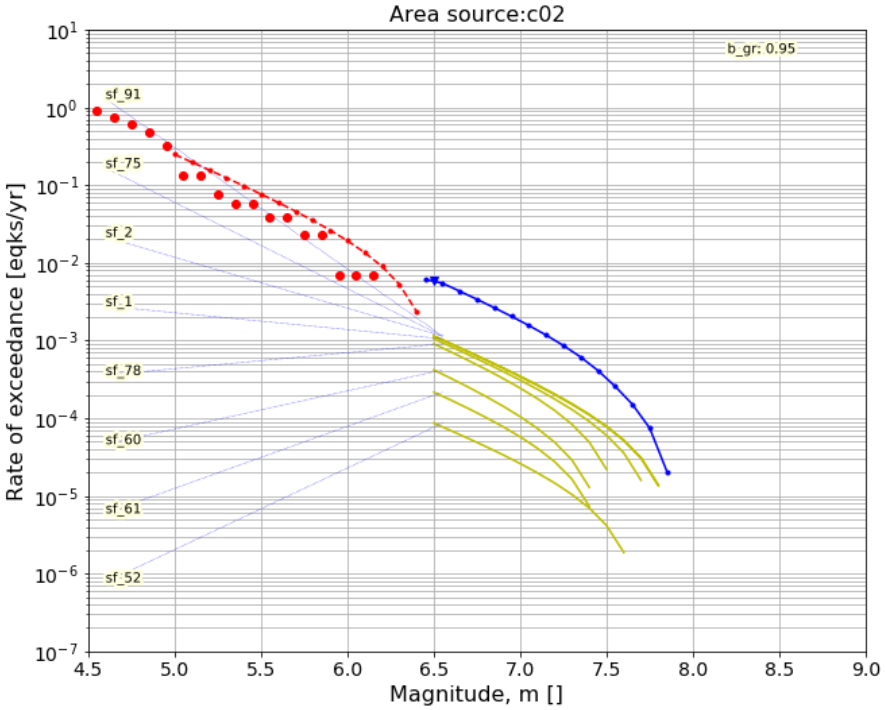



**Figura 57. Distribución de recurrencia de magnitudes para fallas activas de la macro-zona C02**

Fuente: autores

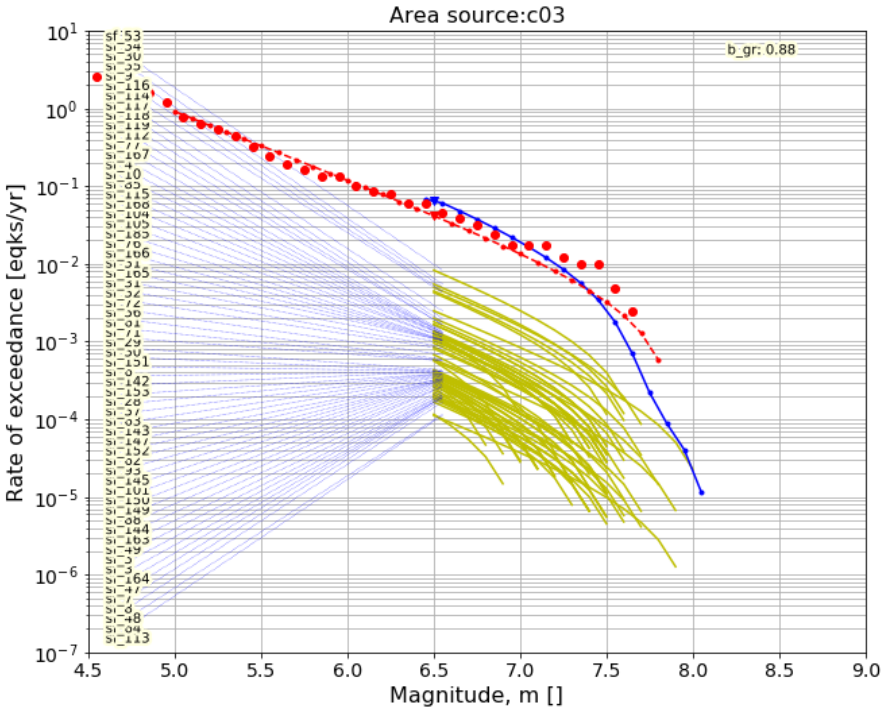



**Figura 58. Distribución de recurrencia de magnitudes de fallas activas de la macro zona C03**

Fuente: autores

La Tabla 23 presenta un resumen de los parámetros principales para cada una de las fallas consideradas en el modelo. El campo *ID* corresponde al identificador de la falla (o segmento de ella); los campos *Usd* y Lsd representan los limites superior e inferior de la capa sismoactiva, respectivamente. El campo *Dip* corresponde al ángulo de buzamiento promedio de la falla (o segmento de ella); el campo *Rake* corresponde al ángulo de deslizamiento promedio de la falla (o segmento de ella) y el campo *Slip* corresponde a la tasa anual de desplazamiento (en mm/año).

**Tabla 23. Parámetros principales de las fuentes sísmicas tipo: fallas simples, pertenecientes al modelo cortical**

| Id | Nombre | Usd | Lsd | Dip | Rake | Slip |
|---|---|---|---|---|---|---|
| sf_192 | Azuero Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 4.500 |
| sf_194 | Azuero Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 4.500 |
| sf_195 | Azuero Fault Zone | 0 | 17 | 80 | -45 | 0.900 |
| sf_199 | Rio Gatun Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 7.200 |
| sf_200 | Limón Fault | 0 | 17 | 80 | -135 | 1.640 |
| sf_240 | Pedro Miguel Fault | 0 | 17 | 90 | 180 | 4.500 |
| sf_241 | Río Gatún Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 4.500 |
| sf_242 | Río Gatún Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 4.500 |
| sf_243 | Río Gatún Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 4.500 |
| sf_287 | La Victoria - El Horno | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_288 | La Victoria - La Cabrera | 0 | 16 | 90 | 180 | 0.900 |
| sf_289 | Tácata - Tácata | 0 | 16 | 72 | 180 | 0.400 |
| sf_290 | Araguita - Araguita | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.400 |
| sf_291 | San Sebastián - Centro | 0 | 17 | 90 | 180 | 2.700 |
| sf_293 | Tacagua - El Ávila - El Ávila | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.400 |
| sf_294 | Tuñame - Norte | 0 | 19 | 72 | -90 | 0.450 |
| sf_295 | Boconó - Lagunillas - Los Mirtos | 0 | 17 | 90 | 180 | 4.500 |
| sf_296 | Lagarto - Lagarto | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.180 |
| sf_297 | Los Médanos - Los Médanos | 0 | 17 | 60 | -90 | 0.180 |
| sf_298 | La Soledad - La Soledad | 0 | 17 | 90 | -135 | 0.270 |
| sf_299 | Costa NE de Falcón - Este | 0 | 17 | 90 | -135 | 0.270 |
| sf_301 | Oca - Ancón - Ancón | 0 | 17 | 90 | 180 | 1.350 |
| sf_302 | Oca - Ancón - Camare - Paraíso 2 | 0 | 17 | 90 | 135 | 1.800 |
| sf_303 | Oca - Ancón - Socremo | 0 | 16 | 52 | 135 | 0.900 |
| sf_304 | Flanco Norandino - Suroeste | 0 | 10 | 30 | 90 | 0.180 |
| sf_305 | Flanco Surandino - Sur 2 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0.450 |
| sf_306 | Burbusay - Burbusay | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.900 |
| sf_307 | Boconó - Santa Cruz de Mora - Los Frailes | 0 | 17 | 90 | 180 | 5.400 |
| sf_308 | Boconó - Cabudare - Morón | 0 | 16 | 72 | 135 | 0.900 |
| sf_309 | La Victoria - Guacamaya Este | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_310 | Valera - Norte 1 | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.450 |
| sf_311 | Valera - Río Momboy | 0 | 18 | 90 | -45 | 0.450 |
| sf_318 | Siquisique - Siquisique | 0 | 17 | 90 | 135 | 0.630 |
| sf_319 | Río Seco - Este | 0 | 16 | 72 | 135 | 0.320 |

| Id | Nombre | Usd | Lsd | Dip | Rake | Slip |
|---|---|---|---|---|---|---|
| sf_325 | La Victoria - La Victoria | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_327 | Río Guárico - Sur | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.300 |
| sf_328 | Río Guárico - Centro | 0 | 15 | 90 | 180 | 0.300 |
| sf_329 | Boconó - Boconó - Palo Colorado | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.900 |
| sf_331 | Costa NE de Falcón - Oeste | 0 | 17 | 90 | -135 | 0.270 |
| sf_332 | Oca - Ancón - Churuguara | 0 | 17 | 90 | -135 | 1.800 |
| sf_333 | Flanco Surandino - Norte 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0.230 |
| sf_334 | Boconó - Mucuchíes -Anzoátegui | 0 | 17 | 90 | 180 | 8.100 |
| sf_335 | La Victoria - Guacamaya Oeste | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_336 | Costa NE de Falcón - Costa Oriental Falcón | 0 | 17 | 90 | -135 | 0.270 |
| sf_340 | Moroturo - Moroturo | 0 | 10 | 30 | 90 | 0.180 |
| sf_343 | La Victoria - Pichao | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.500 |
| sf_345 | Paraguaná Oeste - Paraguaná Oeste | 0 | 17 | 60 | -90 | 0.180 |
| sf_346 | Oca - Ancón - Oca Este | 0 | 17 | 90 | 135 | 0.450 |
| sf_347 | Flanco Norandino - Noreste | 0 | 10 | 30 | 90 | 0.230 |
| sf_348 | Boconó - Anzoátegui - Barquisimeto | 0 | 17 | 90 | 180 | 4.500 |
| sf_349 | Valera - Páramo Miranda | 0 | 20 | 90 | -45 | 0.450 |
| sf_351 | Río Seco - Centro | 0 | 16 | 72 | 135 | 0.320 |
| sf_352 | Murri | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.090 |
| sf_353 | Cubara | 0 | 14 | 45 | 90 | 0.900 |
| sf_355 | Sección Yopal A | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.130 |
| sf_356 | Bucaramanga | 0 | 16 | 72 | 45 | 0.900 |
| sf_357 | Tucura | 0 | 19 | 72 | 90 | 0.450 |
| sf_358 | Mutatá | 0 | 16 | 72 | 45 | 0.450 |
| sf_360 | Jetudo | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.090 |
| sf_361 | El Reposo - El Reposo | 0 | 17 | 90 | 45 | 0.270 |
| sf_362 | Espíritu Santo | 0 | 19 | 72 | -135 | 0.450 |
| sf_363 | Cañas Gordas | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.450 |
| sf_365 | Flanco Surandino - Sur 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0.450 |
| sf_366 | La Tortuga - La Tortuga | 0 | 17 | 90 | 180 | 1.000 |
| sf_367 | Costa NE de Falcón - Centro | 0 | 17 | 90 | -135 | 0.270 |
| sf_368 | Oca - Ancón - Camare - Paraíso 1 | 0 | 17 | 90 | 135 | 1.800 |
| sf_369 | Caparo - Oeste | 0 | 16 | 72 | 180 | 0.900 |
| sf_370 | Valera - Norte 2 | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.900 |
| sf_373 | Murindó | 0 | 17 | 90 | 45 | 0.450 |
| sf_374 | Cubara | 0 | 11 | 45 | 90 | 0.900 |
| sf_375 | Honda | 0 | 16 | 52 | 45 | 0.090 |
| sf_376 | Santa Marta | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.900 |
| sf_377 | Sección Guaicaramo Norte | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.440 |
| sf_378 | Sección Guaicaramo Central | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.440 |
| sf_379 | Sección Guaicaramo Sur | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.440 |
| sf_380 | Urrao | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.450 |
| sf_383 | Oca Oeste | 0 | 16 | 72 | 135 | 2.250 |
| sf_384 | Rio Seco - Oeste | 0 | 16 | 72 | 135 | 0.320 |
| sf_385 | Falla de Algarrobo | 0 | 16 | 72 | 0 | 0.900 |
| sf_387 | Santa Bárbara | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.090 |

| Id | Nombre | Usd | Lsd | Dip | Rake | Slip |
|---|---|---|---|---|---|---|
| sf_388 | Sopetrán | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.180 |
| sf_389 | San Jerónimo | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.090 |
| sf_390 | Sabanalarga | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.090 |
| sf_391 | Sabanalarga | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.090 |
| sf_392 | Cimitarra | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.180 |
| sf_393 | Aguas Calientes S | 0 | 15 | 72 | 135 | 0.450 |
| sf_394 | Sección Yopal B | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.130 |
| sf_395 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_396 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_397 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_398 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_399 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_400 | Aguas Calientes N | 0 | 14 | 72 | 135 | 0.450 |
| sf_401 | Otú-Norte | 0 | 16 | 72 | 45 | 0.450 |
| sf_402 | Bagre-Norte | 0 | 16 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_403 | Oca - Ancón - Oca Centro | 0 | 17 | 90 | 135 | 0.410 |
| sf_404 | Usme | 0 | 19 | 72 | -135 | 0.900 |
| sf_405 | Guayuriba | 0 | 16 | 72 | 135 | 1.350 |
| sf_406 | La Macarena | 0 | 14 | 45 | 90 | 0.090 |
| sf_407 | San Juan de Villalobos-Yunguillo | 0 | 19 | 72 | 135 | 1.800 |
| sf_408 | Sibundoy-La Cocha | 0 | 15 | 90 | 180 | 1.800 |
| sf_409 | Altamira - Pitalito | 0 | 19 | 72 | 135 | 1.800 |
| sf_410 | Algeciras-Balsillas | 0 | 17 | 90 | 180 | 1.800 |
| sf_411 | Zuluaga-Garzón | 0 | 17 | 90 | 180 | 1.800 |
| sf_412 | Afiladores | 0 | 19 | 72 | 135 | 1.800 |
| sf_413 | Guachucal Norte | 0 | 13 | 72 | 135 | 0.900 |
| sf_415 | Guachucal Centro | 0 | 13 | 72 | 135 | 0.900 |
| sf_416 | Buesaco-Aranda | 0 | 17 | 90 | 180 | 1.800 |
| sf_417 | La Cruz | 0 | 15 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_418 | San Pablo | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_419 | San Pablo | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_420 | Corinto | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_421 | Buenavista | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_422 | San Sebastián | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_423 | Sotará | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_424 | El Tambor | 0 | 19 | 72 | 135 | 0.450 |
| sf_425 | Dagua Calima | 0 | 16 | 72 | -45 | 0.450 |
| sf_426 | Saliente de Buga | 0 | 12 | 37 | 90 | 0.270 |
| sf_427 | Ibagué | 0 | 17 | 90 | 180 | 1.350 |
| sf_428 | Montenegro | 0 | 16 | 72 | -45 | 0.450 |
| sf_429 | Pijao | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_430 | Armenia | 0 | 19 | 72 | -45 | 0.450 |
| sf_432 | Campanario | 0 | 17 | 90 | 180 | 0.450 |
| sf_433 | Aranzazu-Manizales | 0 | 14 | 90 | 0 | 0.090 |
| sf_435 | Borde Amazónico | 0 | 14 | 45 | 90 | 0.450 |
| sf_436 | Borde Amazónico | 0 | 14 | 45 | 90 | 0.450 |

| Id | Nombre | Usd | Lsd | Dip | Rake | Slip |
|---|---|---|---|---|---|---|
| sf_437 | Borde Amazónico | 0 | 11 | 45 | 90 | 0.450 |
| sf_438 | Borde Amazónico | 0 | 13 | 45 | 90 | 0.450 |
| sf_440 | Borde Amazónico | 0 | 13 | 45 | 90 | 0.450 |
| sf_442 | Borde Amazónico | 0 | 11 | 45 | 90 | 0.450 |
| sf_443 | Borde Amazónico | 0 | 12 | 45 | 90 | 0.450 |
| sf_444 | Borde Amazónico | 0 | 14 | 45 | 90 | 0.450 |
| sf_445 | Borde Amazónico | 0 | 13 | 45 | 90 | 0.450 |
| sf_446 | Borde Amazónico | 0 | 14 | 45 | 90 | 0.450 |
| sf_464 | Flanco Surandino - Norte 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0.230 |
| sf_465 | Flanco Norandino - Noreste | 0 | 10 | 30 | 90 | 0.230 |
| sf_466 | Sección Yopal A | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.130 |
| sf_467 | Sección Yopal A | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.130 |
| sf_468 | Sección Guaicaramo Norte | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.440 |
| sf_469 | Sección Guaicaramo Central | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.440 |
| sf_470 | Tucura | 0 | 19 | 72 | 90 | 0.450 |
| sf_471 | Espíritu Santo | 0 | 19 | 72 | -135 | 0.450 |
| sf_472 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_473 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_474 | Cimitarra | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.180 |
| sf_475 | Otú-Norte | 0 | 16 | 72 | 45 | 0.450 |
| sf_476 | Bagre-Norte | 0 | 16 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_477 | Honda | 0 | 16 | 52 | 45 | 0.090 |
| sf_478 | Honda | 0 | 16 | 52 | 45 | 0.090 |
| sf_479 | Jetudo | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.090 |
| sf_480 | Jetudo | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.090 |
| sf_482 | Aranzazu-Manizales | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.090 |
| sf_483 | Aranzazu-Manizales | 0 | 17 | 90 | 0 | 0.090 |
| sf_484 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_485 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_486 | Sección Yopal B | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.130 |
| sf_492 | San Sebastián - Centro | 0 | 17 | 90 | 180 | 3.000 |
| sf_529 | Murrí | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.090 |
| sf_530 | Falla de Algarrobo | 0 | 16 | 72 | 0 | 0.900 |
| sf_531 | Bucaramanga | 0 | 16 | 72 | 45 | 0.900 |
| sf_532 | Flanco Norandino - Noreste | 0 | 10 | 30 | 90 | 0.230 |
| sf_534 | Sección Guaicaramo Central | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.440 |
| sf_535 | Flanco Surandino - Norte 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0.230 |
| sf_536 | Flanco Surandino - Sur 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0.450 |
| sf_537 | Flanco Norandino - Noreste | 0 | 10 | 30 | 90 | 0.230 |
| sf_538 | Flanco Surandino - Norte 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0.230 |
| sf_539 | Boconó - Anzoátegui - Barquisimeto | 0 | 17 | 90 | 180 | 4.500 |
| sf_540 | Sección Guaicaramo Central | 0 | 12 | 37 | 90 | 1.440 |
| sf_541 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_542 | Palestina | 0 | 14 | 72 | 45 | 0.180 |
| sf_543 | Espíritu Santo | 0 | 19 | 72 | -135 | 0.450 |

Fuente: autores

En la Figura 59 se presenta la distribución geográfica de las fallas activas incluyendo los parámetros de la Tabla 23. En el Anexo E se incluyen las distribuciones de magnitud-frecuencia para cada falla.

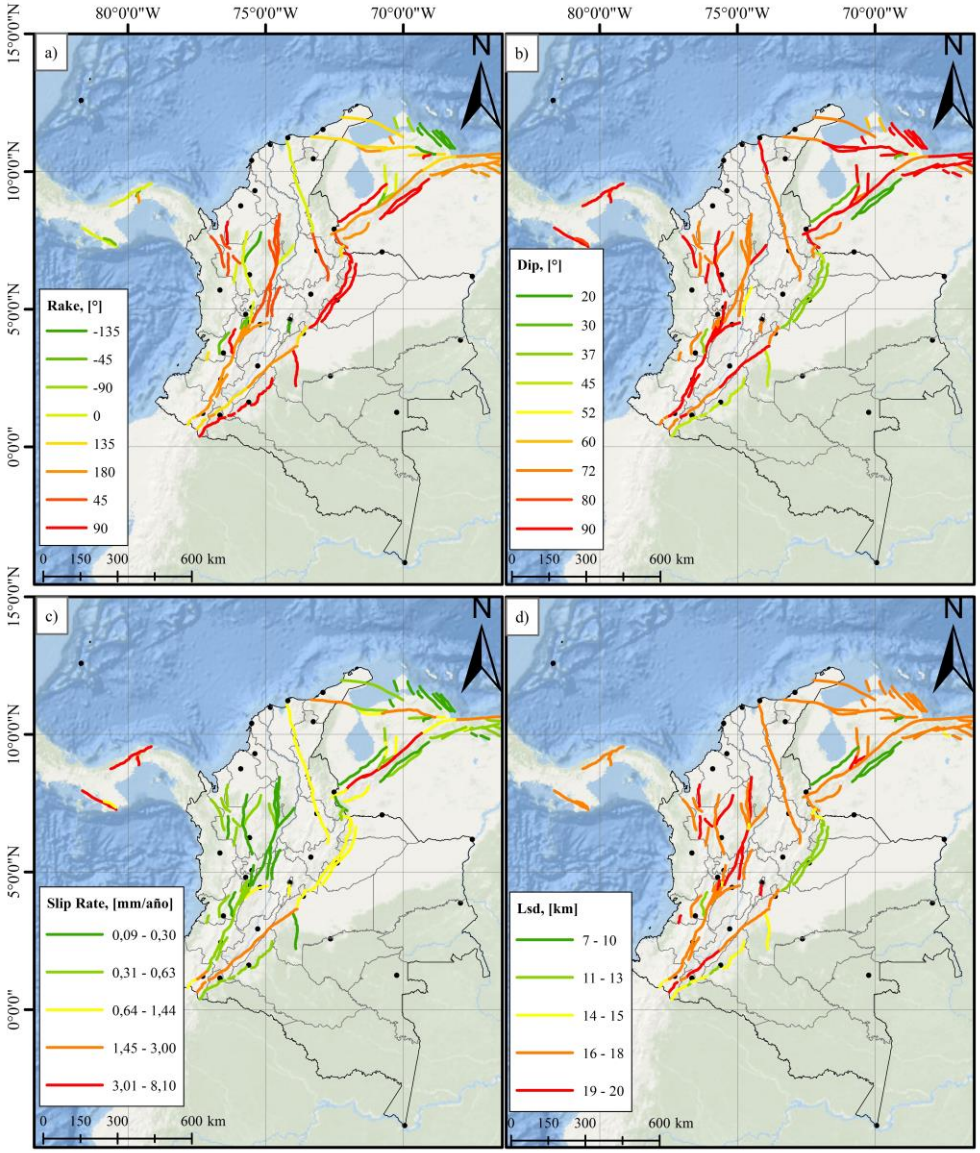



**Figura 59. Parámetros para la caracterización de fallas activas**

Fuente: autores

#### 4.3.2.3 Integración del modelo de sismicidad suavizada y de fallas

La integración del modelo de fuentes puntuales (o sismicidad distribuida tipo kernel) y las fuentes tipo fallas simples es un paso necesario con el fin de evitar un doble conteo de la sismicidad en el entorno geográfico donde ambos modelos se superponen.

Para reducir este efecto, una alternativa de integración consiste en cortar las distribuciones de recurrencia de magnitudes de las fuentes puntuales, considerando como límite máximo la magnitud mínima de la distribución de recurrencia de magnitudes que describe las fallas activas (Pagani et ál., 2016, García et ál., 2017). De esta manera se obtiene un empalme de curvas de recurrencia de magnitudes que restringe el doble conteo de sismos.

### 4.3.3 Modelación de fuentes de subducción y profundas

Generalmente, la modelación de la actividad sísmica en zonas de subducción involucra dos tipologías de fuentes: fuentes en la zona de contacto entre las placas (denominados interplaca) y fuentes intraplaca en la zona de Benioff (denominados intraplaca “intra-slab” o “inslab”).

Las fuentes tipo interplaca, como su nombre indica, representan la sismicidad producida en el contacto entre las placas involucradas en el proceso de subducción, en la zona de mayor acoplamiento entre ellas. Por su parte, las fuentes intraplaca representan la sismicidad que ocurre dentro del volumen que subduce, así como en su entorno (ver Figura 37).

Las fuentes de subducción se definieron y caracterizaron a partir de las experiencias regionales en sur américa y el Caribe, tales como los proyectos South America Risk Assessment (SARA), (García et ál., 2017) y Central America Risk Assessment (CCARA), liderados por la Fundación GEM, con la participación de investigadores locales.

A su vez, se consideraron experiencias del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), de Heuret et ál. (2011) y de Heuret et ál. (2015), respecto a la definición de la geometría de la subducción, la tipología de fuentes, la estimación de parámetros de sismicidad y la segmentación de las fuentes (García et ál. 2017).

Para la modelación de las fuentes de subducción se adoptó el siguiente procedimiento:

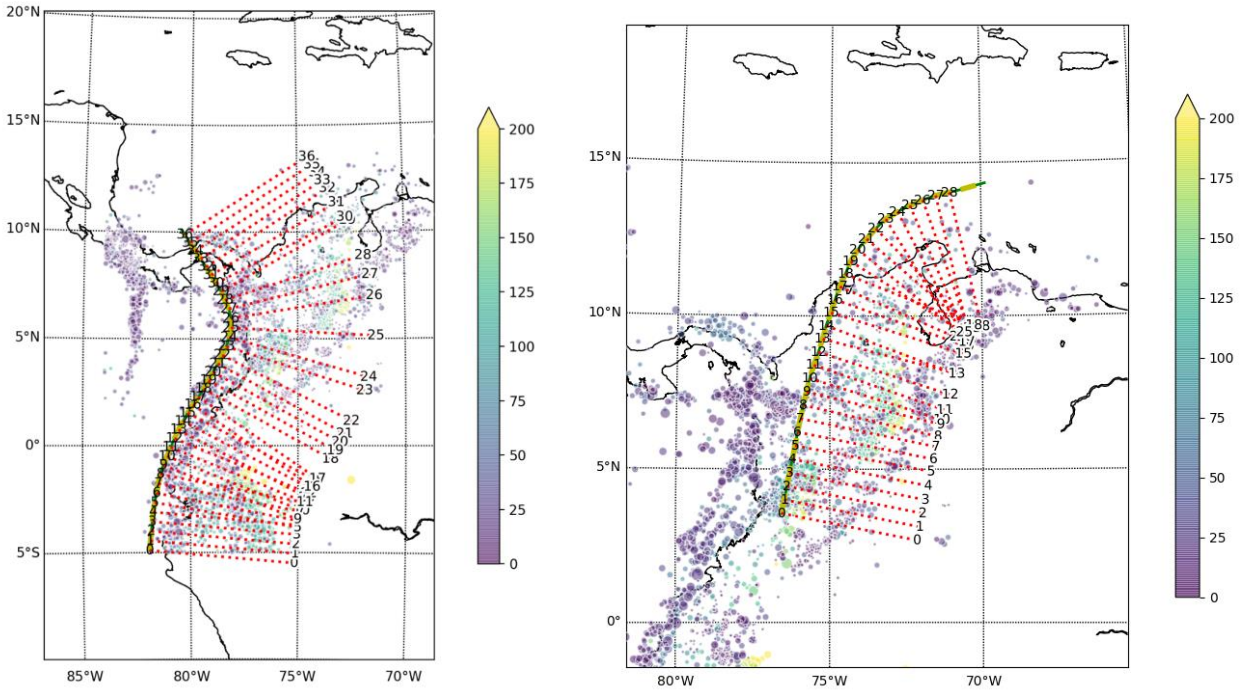
- Definición de la geometría de la placa subducida utilizando un modelo 2.5D, en el cual se busca representar en una superficie (2D) el volumen de la placa (3D).
- Subdivisión geométrica de la placa subducida en zona de interplaca, Benioff y profunda (Nido de Bucaramanga).
- Selección de eventos para cada una de las fuentes (según tipología) y caracterización sísmica.
- Implementación de las fuentes en el motor de cálculo OpenQuake.

En las siguientes secciones se presentan detalles de cada uno de estos pasos.

#### 4.3.3.1 Definición de la geometría de la placa subducida

La definición de la geometría de la placa subducida es el primer paso en la caracterización de estas fuentes y corresponde a uno de los más importantes. Para este propósito se define un numero de secciones a lo largo de la trinchera (y perpendiculares a la zona de Benioff) donde la placa de Nazca se introduce debajo de la placa de Suramérica. El principal objetivo es caracterizar, desde un punto sismotectónico, la distribución de eventos en profundidad en cada perfil y obtener una geometría generalizada de la placa en términos de los límites superior e inferior, cambios en la orientación y profundidad, así como criterios válidos para una posible segmentación.

La Figura 60 presenta las secciones utilizadas para a) la región colombo-ecuatoriana y b) el nido sísmico de Bucaramanga. El número de secciones a construir a lo largo de la trinchera (o perfil geográfico tomado como referencia) se definió a partir de la densidad de la información usada en el análisis y su resolución en profundidad a lo largo de cada una de las secciones. A su vez, se tuvo en cuenta que dicha información no fuera redundante y que permitiera la inferencia de la geometría de la placa subducida.




a) b)

**Figura 60. Mapas con las secciones creadas para para definir la geometría de: a) subducción Nazca/Suramérica y sismicidad profunda (Bucaramanga). La escala representa la profundidad de los eventos presentes en el catálogo**

Fuente: autores

La Figura 61 presenta ejemplos de secciones creadas para caracterizar el proceso de subducción entre las placas Nazca y Suramérica. Similarmente, la Figura 62 presenta secciones para caracterizar la sismicidad profunda del nido de Bucaramanga. A partir de estos perfiles y de la distribución de hipocentros de sismos a lo largo de éstos, es posible identificar la profundidad indicativa del límite superior de la placa subducida (línea negra discontinua).

A su vez, en estas secciones se incluyen clasificaciones de los mecanismos de ruptura (según Kaverina et ál., 1996), que permiten también realizar una diferenciación de las zonas interplaca (de mayoría tipo inverso o "reverse") y Benioff – en las cuales la mayoría de eventos son de tipo Normal y Strike Slip.

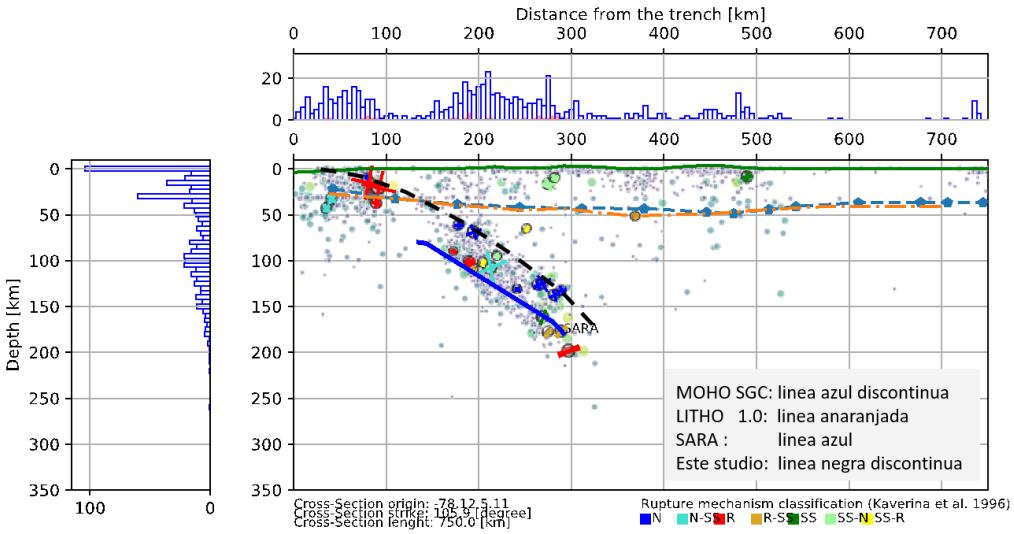



**Figura 61. Ejemplo de secciones creadas para para definir la geometría del proceso de subducción entre las placas Nazca y Suramérica**

Fuente: autores

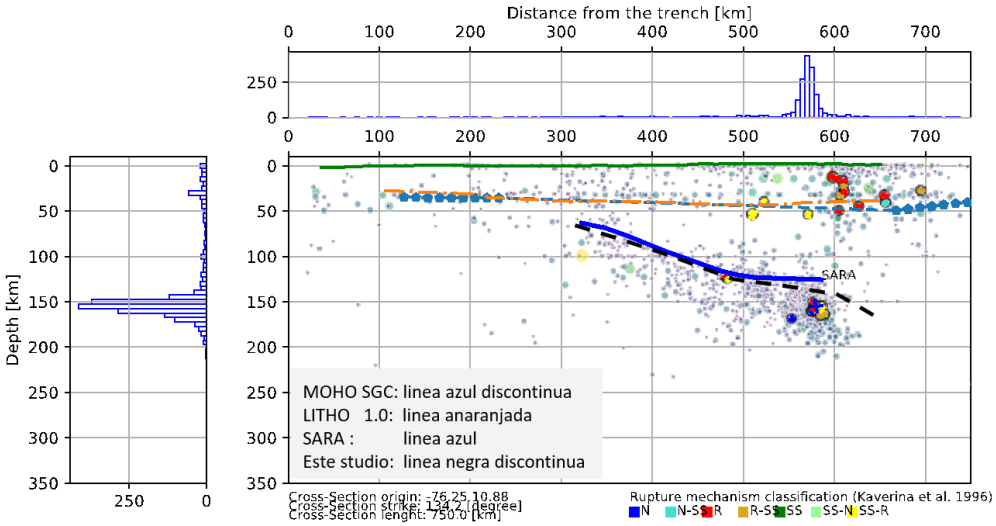
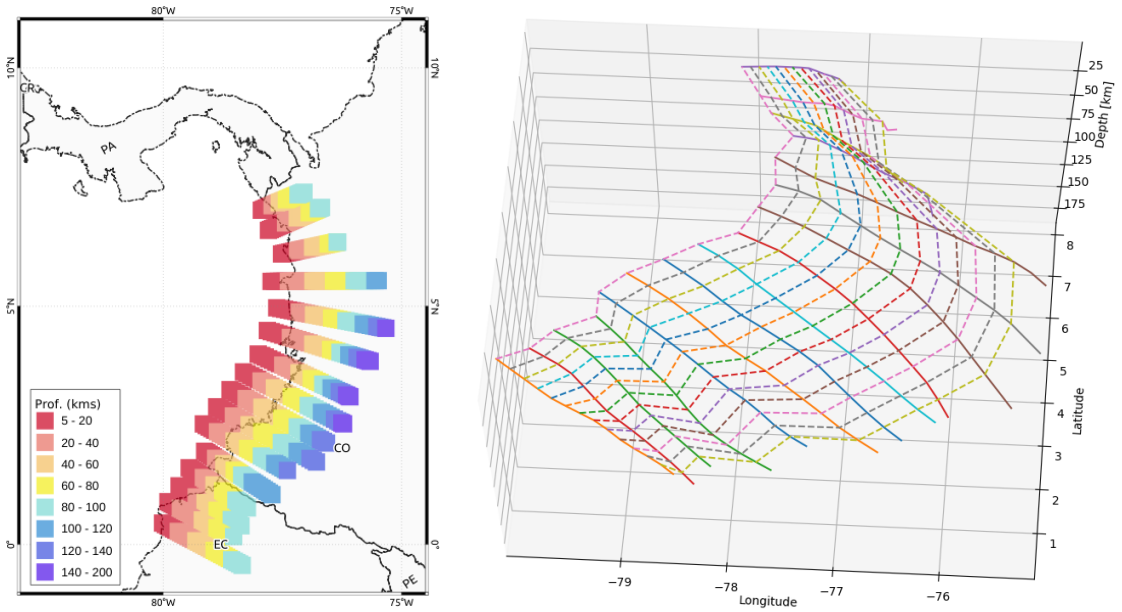



**Figura 62. Ejemplo de secciones creadas para para definir la geometría de la sismicidad del Nido de Bucaramanga**

Fuente: autores

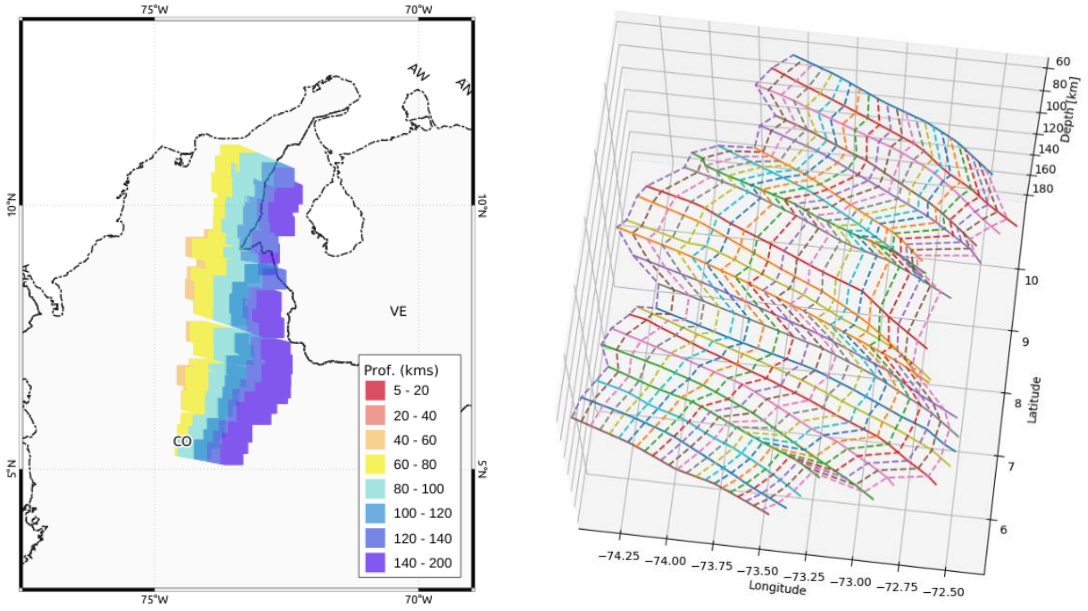
Los análisis realizados en cada perfil se integraron en un modelo 2.5D obteniendo una superficie que representa el límite superior de la placa subducida. La Figura 63 y la Figura 64 presentan las superficies obtenidas para la subducción colombo-ecuatoriana, así como la obtenida para el nido sísmico de Bucaramanga (respectivamente). A su vez, mediante este modelo se obtiene una aproximación la geometría de la placa subducida y sus variaciones en profundidad.




a) b)

**Figura 63. Tope del volumen de subducción entre las placas Nazca y Suramérica en la región colombo-ecuatoriana: a) variaciones en profundidad y b) superficie (2.5D) obtenida**

Fuente: autores




a) b)

**Figura 64. Tope del volumen subducido para la región del nido sísmico de Bucaramanga (sismicidad profunda): a) variaciones en profundidad y b) superficie (2.5D) obtenida**

Fuente: autores

Por otro lado, el límite inferior de la placa subducida se define utilizando la información contenida en los perfiles y el conocimiento acumulado sobre el proceso de subducción en el pacífico colombiano por otros estudios (Pedraza – García et ál., 2007; Chiarabba et ál., 2015).

#### 4.3.3.2 Subdivisión geométrica de la placa subducida en zonas interplaca y Benioff

Para el análisis de amenaza, además de conocer la geometría de la placa subducida, es necesario discriminar dicha placa en zonas interplaca e intraplaca, ya que en dichas zonas se generan rupturas de diferentes características (mecanismos focales, magnitudes y profundidades).

Para las fuentes interplaca, se asume que los eventos ocurren en la superficie del tope de la placa subducida (o en su entorno, si se consideran incertidumbres asociadas a su definición). De esta manera, es relevante definir las profundidades superior (usd) e inferior (lsd) de la zona interplaca, así como la variación de la profundidad en la dirección del buzamiento promedio del proceso de subducción (ver Figura 37).

Como referencia, la Figura 65 presenta rangos de profundidades de las fuentes interplaca pertenecientes a los modelos de amenaza compilados en la base de datos de la Fundación GEM (versión 2017): RES12 (Benito et ál., 2012 para Centro América); SOA10 (Petersen et ál., 2010 para Sur América) y SAR16 (García et ál., 2017), proyecto SARA para Sur América. De esta figura se observa que se han utilizado profundidades entre 10 km y 15 km (líneas punteadas) para establecer el límite superior de la zona interplaca.

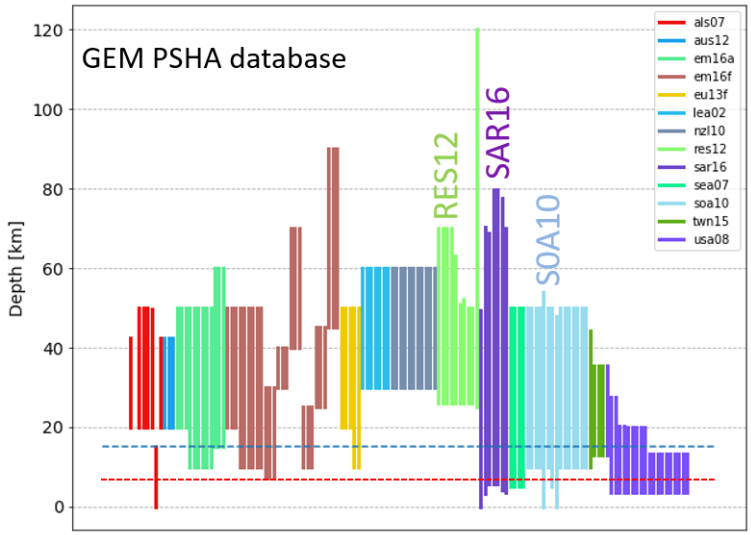



**Figura 65. Dimensiones de fuentes interplaca; profundidad de los límites: mínimo y máximo**

Fuente: autores

La delimitación en profundidad de los límites (mínimo y máximo) de las fuentes interplaca se realizó a partir de la información contenida en las secciones definidas para la placa de subducción del pacífico, respecto a mecanismos focales, dimensión, orientación y tipología predominante de las rupturas.

Tal análisis se complementó con experiencias de modelos compilados por la Fundación GEM (ver Figura 65) y con estudios previos enfocados en la definición de la geometría del proceso de subducción del pacífico colombiano (Pedraza-García et ál., 2007). Como referencia, se consideraron también los resultados de Lay et ál. (2012), Thingbaijam y Mai (2016) y Heuret et ál. (2011).

Con el fin de considerar incertidumbres (epistémicas) asociadas a las limitaciones en el conocimiento del proceso de subducción y de las fuentes interplaca, se plantearon dos modelos alternativos, variando los siguientes aspectos:

- *Profundidad de diferenciación entre zonas interplaca y Benioff*: Al respecto, se consideran dos profundidades (40 y 50 km) como el límite inferior (lsd) para las fuentes interplaca. Vale la pena señalar que la selección de tales profundidades también define el límite superior (usd) de la zona Benioff .La Figura 67 y la Figura 68 presentan la geometría en planta y los límites de profundidad de estas fuentes.
- *Segmentación de la placa*: Al respecto, se consideran dos aproximaciones: (i) un modelo no segmentado, para el cual se estiman los parámetros de sismicidad en toda la fuente; (ii) un modelo segmentado, en el cual, para cada segmento se estiman los parámetros de sismicidad.

De acuerdo con una revisión de la sismicidad de la subducción del pacífico colombiano, Sarria (1995) señala que se encuentran más sismos con magnitudes iguales o superiores a 5 en el sur del país, en el borde con ecuador, que en la parte norte. De esta manera, se considera conveniente dividir la subducción para una mejor comprensión de la amenaza.

Según Arcila y Dimaté (2005) y Monsalve et ál. (2009), a partir de un análisis que combina la distribución geográfica de la sismicidad, anomalías gravimétricas y la morfología de la parte oriental de la cuenca de Panamá y la fosa colombiana, se proponen las siguientes zonas de comportamiento similar para la zona de subducción del pacífico:

- *Subducción Norte*: que corresponde a la subducción del bloque Coiba bajo el noroeste de Colombia.
- *Subducción Centro*: localizado al sur del departamento de Chocó y en el departamento del Valle del Cauca.
- *Subducción Sur*: localizado en los departamentos de Cauca, Nariño y norte de Ecuador.

La Tabla 24 y la Figura 66 presentan las características de los segmentos de la zona de subducción definidos por Arcila y Dimaté (2005).

**Tabla 24. Características de los segmentos de la zona de subducción**

| Segmento | Longitud en la fosa (km) | Orientación (Azimut( | Buzamiento | Magnitud máxima (Mw) |
|---|---|---|---|---|
| Norte | 170 | 130° | 25° - 40° | 7.8 |
| Centro | 160 | 20° | 40°-110° | 7.8 |
| Sur | 550 | 40° | 30° - 130° | 8.8 |

Fuente: Arcila y Dimaté (2005)

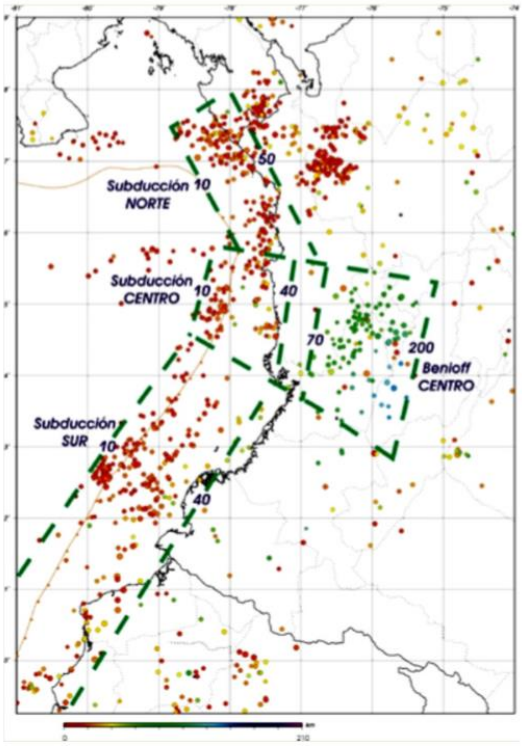



**Figura 66. Segmentación de la zona de subducción de Colombia**

Fuente: Arcila y Dimaté (2005)

En el modelo no segmentado, la zona interplaca abarca desde la costa norte de Ecuador hasta Panamá; los límites de profundidad (usd, lsd) se estiman en 5 y 50 km de profundidad. Por otro lado, en el modelo segmentado estos límites son fijados en 5 y 40 km. La Figura 67 presenta la geometría de las fuentes interplaca para los modelos no segmentado y segmentado.

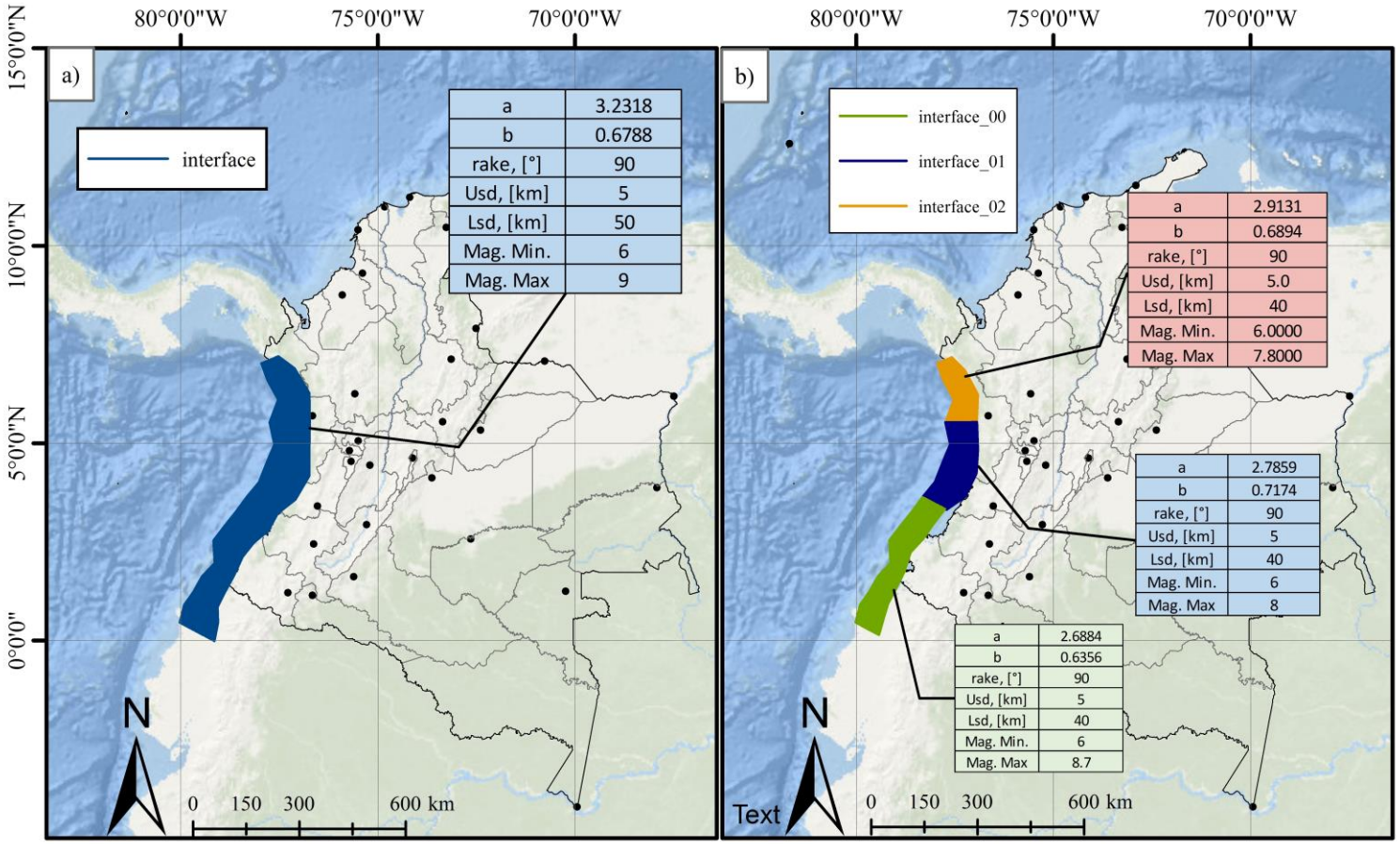



**Figura 67. Parámetros de sismicidad de fuentes interplaca del proceso de subducción del pacífico (a) modelo no segmentado; (b) modelo segmentado**

Fuente: autores

#### 4.3.3.3 Selección de eventos para cada una de las fuentes según su tipología y caracterización sísmica

La selección de los eventos en cada una de las fuentes y su clasificación se ha efectuado siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.1.5. Al respecto, se resalta que las geometrías definidas para las zonas interplaca e intraplaca (tanto en planta como en profundidad) se utilizaron para seleccionar sub-conjuntos de eventos del Catálogo Sísmico Integrado depurado (sin eventos dependientes). Tales sub-conjuntos se utilizaron para caracterizar las fuentes sísmicas según su clasificación tectónica.

A su vez, vale la pena señalar que en el proceso de selección se consideró como referencia la siguiente información:

- *Mecanismos focales*: Respecto al tipo de ruptura y su orientación, se encuentra que la mayoría de los sismos interplaca son de tipo inverso (reverse), mientras que en la zona Benioff, la mayoría de eventos son de tipo normal y strike-slip.
- *Modelos estructurales*: Limite Moho, limite corteza/manto (Moho, Figura 36).
- *Topografía/Batimetría* [Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) topography (Farr, 2007)
- General Bathymetric Charts of the Ocean (GEBCO) bathymetry (Weatherall et ál., 2015)
- *Volcanes*: Se utiliza la localización de los volcanes, como indicadores de variaciones en la geometría de la placa subducente y el límite interplaca/Benioff.
- *Otros modelos*: Geometría de la placa según los modelos SLAB1.0, SLAB2.0, (Hayes et ál., 2012; 2018); proyecto SARA, (García et ál., 2017)).

Una vez seleccionados los eventos se procedió a calcular los parámetros de sismicidad de las fuentes. Los parámetros *a* y *b* fueron obtenidos usando el método de máxima verisimilitud propuesto por Weichert (1980) disponible en la herramienta HMTK (Weatherill, 2014). Un resumen de dichos parámetros se presentan en la Figura 67 (para fuentes interplaca), Figura 68 (fuentes de la zona Benioff) y Figura 69 (fuentes del nido sísmico de Bucaramanga).

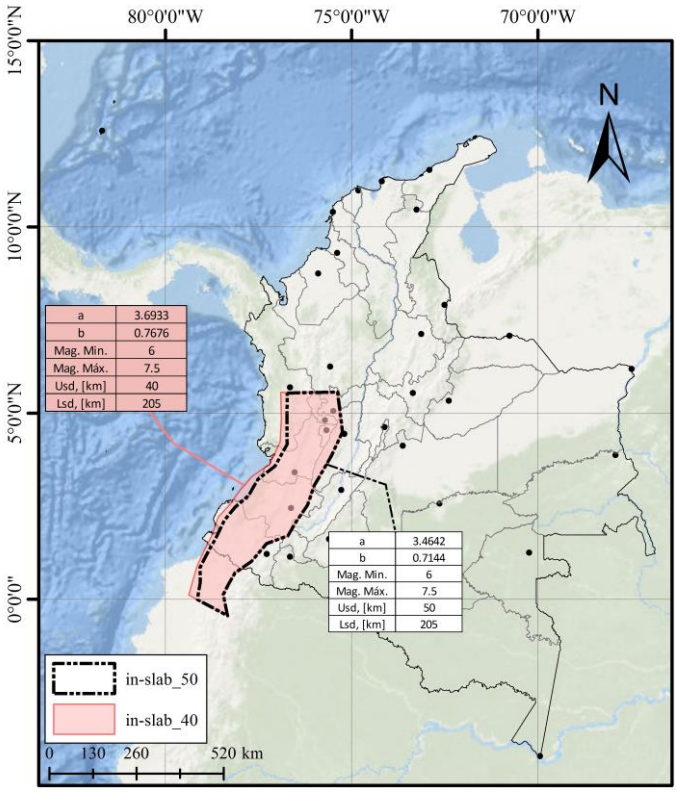



**Figura 68. Parámetros de sismicidad de fuentes de la zona Benioff**

Fuente: autores

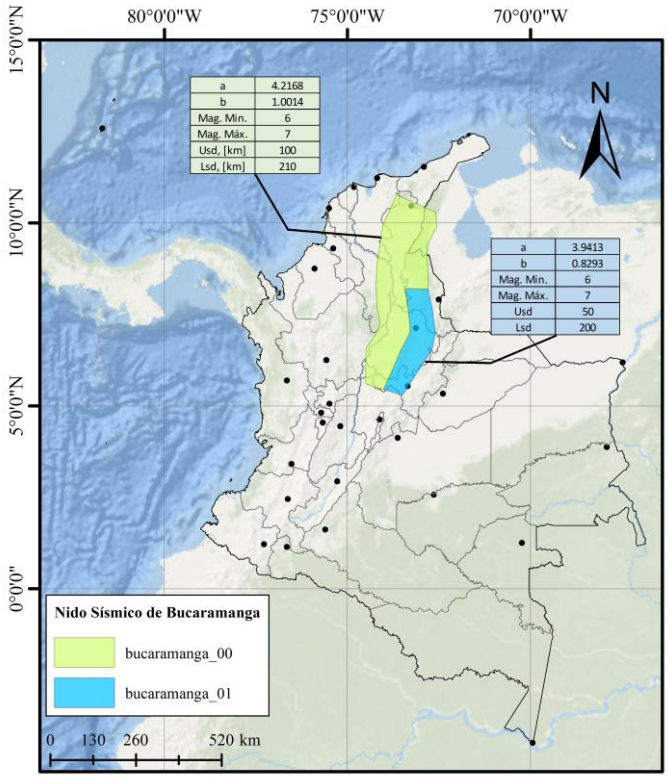



**Figura 69. Parámetros de sismicidad de fuentes del nido de Bucaramanga**

Fuente: autores

#### 4.3.3.4 Modelación de fuentes interplaca

Para modelar las fuentes interplaca se utilizó un tipo de fuente denominado "falla compleja" del motor de cálculo OpenQuake. Este tipo de fuente permite considerar variaciones de la profundidad en la geometría de la falla, lo cual favorece un mayor refinamiento en la simulación de posibles rupturas de la fuente.

Para definir la geometría de la fuente se definen dos bordes que limitan la superficie superior en inferior en la dirección de buzamiento de la placa subducente. Además, se definen límites intermedios a lo largo de fuente (ver Figura 70). El borde superior se definió en 5 km y el borde inferior varía entre 40 y 50 km, según las alternativas descritas en la sección 4.3.3.2.

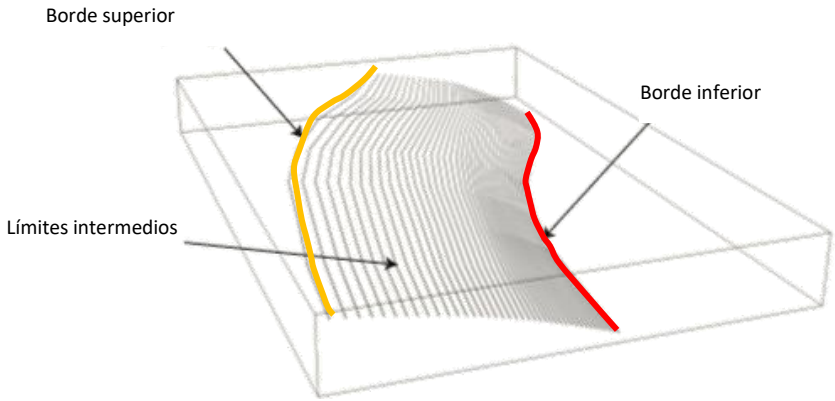



**Figura 70. Ejemplo de una falla compleja**

Fuente: adoptado de Pagani et ál. (2014)

Además de la geometría, para caracterizar estas fuentes se requieren los siguientes parámetros:

- *Distribución de frecuencia de magnitudes*: obtenida a partir del análisis de parámetros de sismicidad;
- *Relación de escala de magnitudes*: se considera la relación propuesta por Strasser et ál. (2010).
- *Relación de aspecto del área de ruptura*: se adopta un valor de 4.0.
- *Geometría de la ruptura*: Corresponde el ángulo de deslizamiento (rake) de las rupturas. Se considera un valor de 90.

Mediante este tipo de fuente, para un rango específico de magnitudes (según la distribución de magnitud-frecuencia), las rupturas "flotan" a lo largo de la superficie de la falla.

La Figura 71 presentan variaciones de la profundidad de la superficie de fuentes interplaca para el modelo no segmentado, en el que se considera una profundidad límite de 50 km.

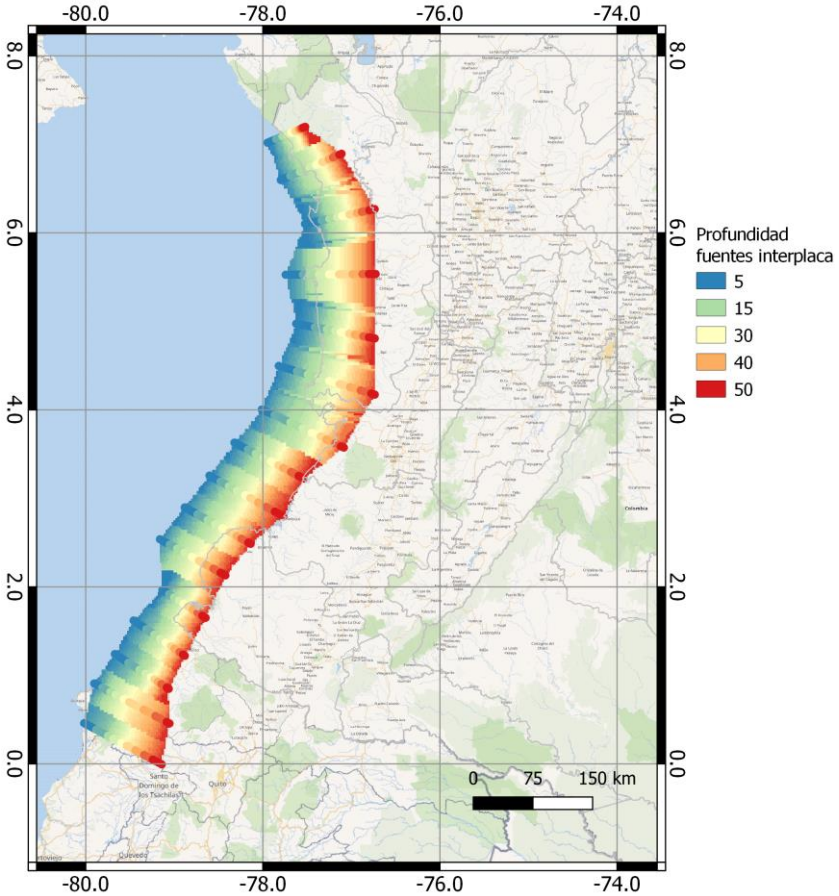



**Figura 71. Profundidad de la superficie de fuentes interplaca. Modelo no segmentado**

Fuente: autores

### 4.3.3.5 *Modelación de fuentes intraplaca*

Para la modelación de las fuentes en la zona de Benioff y del nido sísmico de Bucaramanga se utilizó el tipo de fuentes no paramétricas establecido en el motor de cálculo OpenQuake. Este tipo de fuente representa una colección de rupturas. Esta colección se define a partir de un algoritmo el cual modela la ruptura como una malla de puntos que representan una aproximación de la placa que subduce más allá del límite último de profundidad de la zona de interplaca.

La geometría de las rupturas está restringida en la dirección del buzamiento de la placa (y en su dirección conjugada) y están confinadas dentro del volumen de la placa que subduce. La Figura 72 y la Figura 73 presentan, respectivamente, la vista en planta y en profundidad de la malla de puntos definida para rupturas de magnitud 6.05 en la zona de Benioff.

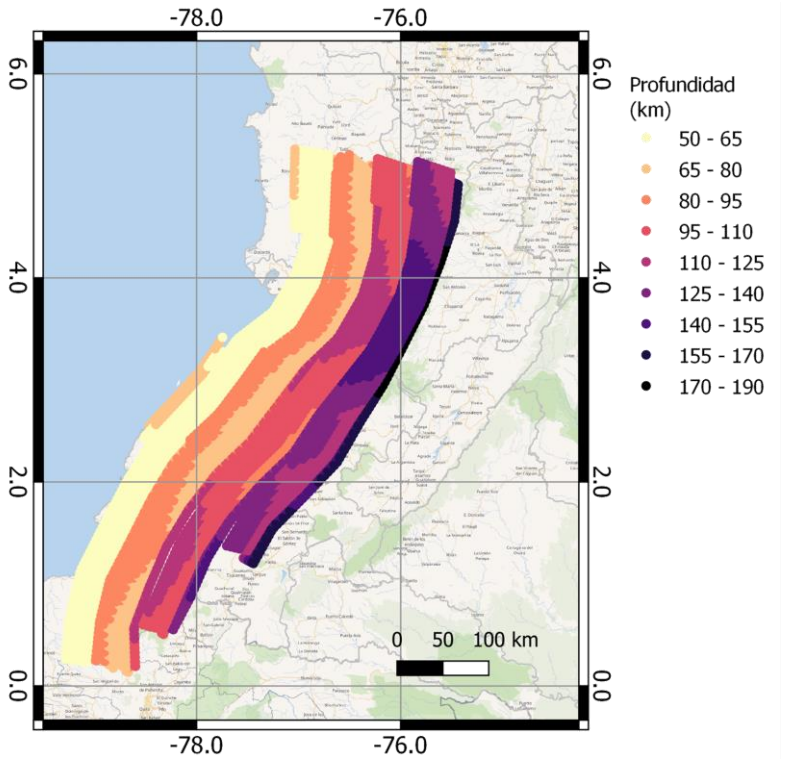



**Figura 72. Vista en planta de la malla que representa la placa en la zona de Benioff correspondiente a una magnitud de 6.05 Mw**

Fuente: autores

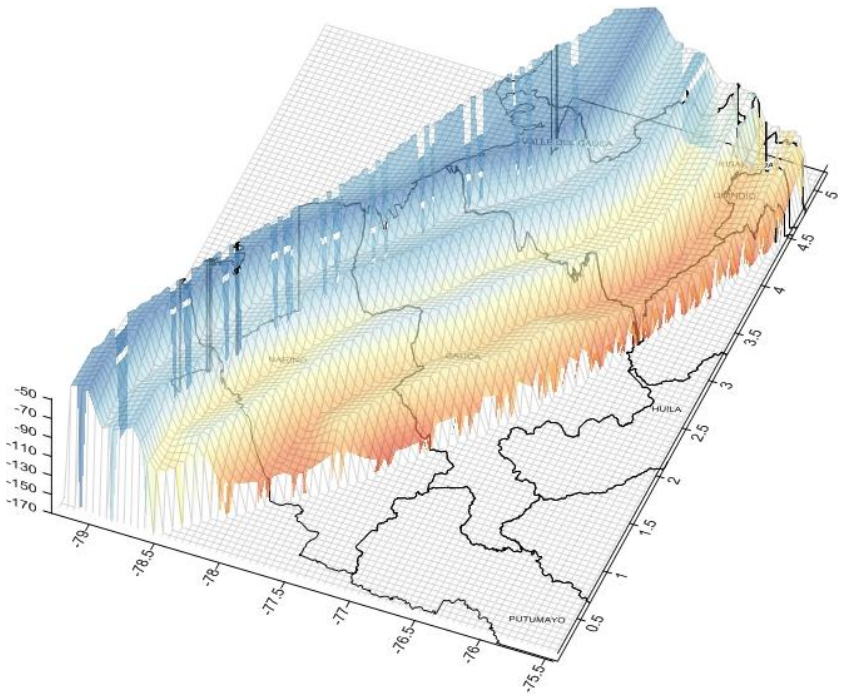



**Figura 73. Malla de puntos de la placa en la zona de Benioff correspondiente a una magnitud de 6.05 Mw**

Fuente: autores

Para caracterizar la ocurrencia de terremotos de cada una de las fuentes de subducción e intraplaca, se usa un catálogo regionalizado según ambientes tectónicos (ver sección 4.1), considerando una distribución de Gutenberg-Richter doblemente truncada, similar a los casos anteriormente descritos.

La magnitud mínima considera en las distribuciones de magnitud frecuencia es de 6.0 Mw, mientras que la magnitud máxima ha sido definida de acuerdo con una función de escala (Strasser et ál., 2010), teniendo en cuenta la geometría de la fuente, así como información de terremotos históricos.

Vale destacar que para las zonas intraplaca (Benioff), las tasas de ocurrencia para cada una de las rupturas no paramétricas fueron obtenidas a partir de las tasas de ocurrencia de la distribución de magnitud frecuencia de todo el volumen.

Para cada ruptura se definen magnitudes, la localización del hipocentro y su geometría. A su vez se asignan probabilidades de ocurrencia en un periodo de investigación.

En el Anexo F se presentan detalles de las distribuciones de magnitud frecuencia de las fuentes de interplaca, de la zona Benioff y del nido sísmico de Bucaramanga.

# 5. SELECCIÓN DE ECUACIONES DE ATENUACIÓN

Las ecuaciones de atenuación (GMPEs por la sigla en inglés de *Ground Motion Prediction Equations*) permiten estimar, para un sitio determinado, la intensidad esperada del movimiento (en términos de aceleraciones espectrales) a partir de la magnitud de los sismos, la distancia entre el evento y el sitio de interés, entre otros parámetros de carácter sísmico, tectónico, físico y geométrico (PEER, 2013; Kaklamanos et ál., 2011).

A nivel global, las ecuaciones de atenuación han sido desarrolladas a partir de diferentes bases de datos, para diferentes ambientes tectónicos y con diferentes métricas y formas funcionales. En Ojeda y Martínez (1997), Gallego (2000) y Bernal (2014) se encuentran ecuaciones de atenuación desarrolladas considerando registros acelerográficos de Colombia.

Entre los alcances y limitaciones de las ecuaciones de atenuación derivadas para el caso colombiano se encuentran las siguientes: (i) son aplicables para la estimación de aceleraciones para periodos de vibración de hasta 2 segundos; (ii) para su desarrollo no se contó con datos suficientes para la estimación de intensidades del movimiento para sismos de magnitudes superiores a 7.0 Mw; (iii) para el momento de su desarrollo no se contó con una caracterización de los efectos de sitio en la localización de las estaciones; la información disponible correspondía a una clasificación geológica de la estación en las categorías “roca” y “suelo”.

Para la elaboración del modelo nacional de amenaza sísmica, el SGC realizó un análisis estadístico a partir del cual se obtiene un árbol lógico que corresponde a un conjunto de ecuaciones de atenuación que mejor se ajustan a las aceleraciones espectrales observadas en el territorio nacional, así como sus porcentajes de participación correspondientes. Mediante este árbol es posible calcular un valor ponderado de las aceleraciones espectrales que se obtienen de los diferentes modelos seleccionados, considerando la incertidumbre epistémica producto de la variedad de GMPEs existentes (Al Atik & Youngs, 2014).

Como antecedentes, en el marco del proyecto South America Risk Assessment (SARA, García et ál., 2017), el SGC participó en la revisión y selección de ecuaciones de atenuación con mejor ajuste a los datos observados de eventos sísmicos de Sur América. Dicho trabajo se llevó a cabo comparando los registros sísmicos de la red de acelerógrafos con las ecuaciones más recientes en uso a nivel global y nacional, obteniendo un conjunto de ecuaciones para los siguientes ambientes tectónicos: fuentes corticales, de interplaca e intraplaca, así como para diferentes periodos estructurales (García et ál., 2017).

En este capítulo se presenta el procedimiento (ver Figura 74) y se describen los resultados obtenidos en el proceso de selección de ecuaciones y de definición de árboles lógicos para cada ambiente tectónico y periodos estructurales considerados.

El análisis se llevó a cabo utilizando la base de datos de movimiento fuerte (ver sección 3.3), así como la caracterización de efectos de sitio en la localización de las estaciones (ver sección 3.3.2). Dicha caracterización es un avance importante, ya que permite tener una evaluación más detallada de las intensidades del movimiento esperadas, en contraste con los modelos en los que se consideran las categorías de "suelo" y "roca" para describir la geología de las estaciones.

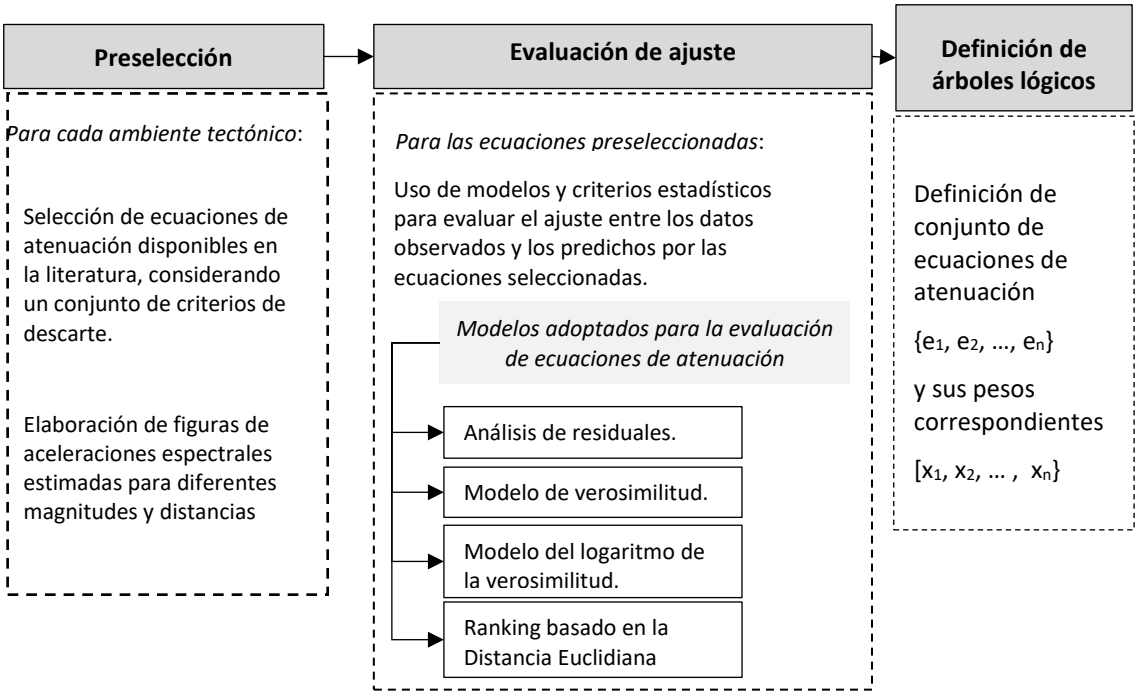



**Figura 74. Procedimiento empleado para la selección de ecuaciones de atenuación**

Fuente: autores

## 5.1 Pre selección de ecuaciones de atenuación

Se realizó una pre selección de ecuaciones de atenuación disponibles en la literatura, con el fin de reducir el número de ecuaciones a incluir en la evaluación de ajuste respecto a los movimientos del terreno observados.

La pre selección se realizó teniendo en cuenta un catálogo global de ecuaciones de atenuación (Douglas 2018), la metodología y resultados obtenidos en la pre selección de ecuaciones de atenuación para diferentes ambientes tectónicos en Sur América (García et ál., 2017).

La pre selección realizada incluye de manera implícita los criterios propuestos por Cotton et ál. (2006) que permiten descartar ecuaciones de atenuación y que se presentan a continuación:

- El modelo fue determinado para un ambiente tectónico irrelevante para la región de estudio.

- El modelo no ha sido publicado en una revista indexada o no ha estado sometido a un proceso de revisión de pares.
- La documentación del modelo y su set de datos se considera insuficiente.
- El modelo ha sido actualizado en nuevas publicaciones.
- El rango de frecuencias definidas para el modelo es insuficiente para su aplicación en ingeniería.
- El modelo tiene una forma funcional inapropiada.
- Los métodos de regresión y sus coeficientes se consideran inapropiados.

En el proceso de pre selección se dio prioridad a ecuaciones con período estructural máximo definido de al menos cinco segundos. Sobre estas ecuaciones se señala que, además de haber sido evaluadas mediante las metodologías adoptadas para el presente estudio (ver sección 5.2), algunas fueron descartadas debido al rango de períodos estructurales para las cuales son válidas (menores a cinco segundos).

La Tabla 25, la Tabla 26 y la Tabla 27 presentan las ecuaciones pre seleccionadas para los ambiente tectónico cortical, interplaca e intraplaca, respectivamente.

**Tabla 25. Ecuaciones pre seleccionadas para eventos corticales**

| Nombre | Fuente |
|---|---|
| AbrahamsonEtAl2014 | Abrahamson et ál. (2014) |
| AbrahamsonEtAl2014RegCHN | |
| AbrahamsonEtAl2014RegJPN | |
| AbrahamsonEtAl2014RegTWN | |
| AbrahamsonSilva2008 | Abrahamson & Silva (2008) |
| AkkarCagnan2010 | Akkar & Cagnan (2010) |
| AkkarEtAlRepi2014 | Akkar, et ál. (2014) |
| AkkarEtAlRhyp2014 | |
| AkkarEtAlRjb2014 | |
| BindiEtAl2014Rhyp | Bindi et ál. (2014) |
| BindiEtAl2014RhypEC8 | |
| BindiEtAl2014RhypEC8NoSOF | |
| BindiEtAl2014Rjb | |
| BindiEtAl2014RjbEC8 | |
| BindiEtAl2014RjbEC8NoSOF | |
| BooreAtkinson2008 | Boore & Atkinson (2008) |
| BooreEtAl2014 | Boore et ál. (2014) |
| BooreEtAl2014CaliforniaBasin | |
| BooreEtAl2014CaliforniaBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014HighQ | |
| BooreEtAl2014HighQCaliforniaBasin | |
| BooreEtAl2014HighQCaliforniaBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014HighQJapanBasin | |

| Nombre | Fuente |
|---|---|
| BooreEtAl2014HighQJapanBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014HighQNoSOF | |
| BooreEtAl2014JapanBasin | |
| BooreEtAl2014JapanBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014LowQ | |
| BooreEtAl2014LowQCaliforniaBasin | |
| BooreEtAl2014LowQCaliforniaBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014LowQJapanBasin | |
| BooreEtAl2014LowQJapanBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014LowQNoSOF | |
| BooreEtAl2014NoSOF | |
| CampbellBozorgnia2014 | Campbell & Borzognia (2014) |
| CampbellBozorgnia2014HighQ | |
| CampbellBozorgnia2014HighQJapanSite | |
| CampbellBozorgnia2014JapanSite | |
| CampbellBozorgnia2014LowQ | |
| CampbellBozorgnia2014LowQJapanSite | |
| CauzziEtAl2014 | Cauzzi et ál. (2014) |
| CauzziEtAl2014Eurocode8 | |
| CauzziEtAl2014Eurocode8NoSOF | |
| CauzziEtAl2014FixedVs30 | |
| CauzziEtAl2014FixedVs30NoSOF | |
| CauzziEtAl2014NoSOF | |
| CauzziFaccioli2008 | Faccioli & Cauzzi (2008) |
| CauzziFaccioli2008SWISS01 | |
| CauzziFaccioli2008SWISS04 | |
| CauzziFaccioli2008SWISS08 | |
| ChiouYoungs2014 | Chiou & Youngs (2014) |
| FaccioliEtAl2010 | Faccioli et ál. (2010) |
| Idriss2014 | Idriss (2014) |
| Kanno2006Deep | Kanno et ál. (2006) |
| Kanno2006Shallow | |
| ZhaoEtAl2016Asc | Zhao et ál. (2016 a) |
| ZhaoEtAl2016AscSiteSigma | |
| ZhaoEtAl2016UpperMantle | |
| ZhaoEtAl2016UpperMantleSiteSigma | |

Fuente: autores

**Tabla 26. Ecuaciones pre seleccionadas para eventos de Interplaca**

| Nombre | Fuente |
|---|---|
| AbrahamsonEtAl2015SInter | Abrahamson et ál. (2016) |
| AbrahamsonEtAl2015SInterHigh | |
| AbrahamsonEtAl2015SInterLow | |
| GhofraniAtkinson2014 | Ghofrani & Atkinson (2014) |
| GhofraniAtkinson2014Cascadia | |
| GhofraniAtkinson2014CascadiaLower | |
| GhofraniAtkinson2014CascadiaUpper | |
| GhofraniAtkinson2014Lower | |
| GhofraniAtkinson2014Upper | |
| Kanno2006Deep | Kanno et ál. (2006) |
| Kanno2006Shallow | |
| LinLee2008SInter | Lin & Lee (2008) |
| MontalvaEtAl2016SInter | Montalva et ál. (2017) |
| YoungsEtAl1997SInter | Youngs et ál. (1997) |
| YoungsEtAl1997SInterNSHMP2008 | |
| ZhaoEtAl2006SInter | Zhao et ál. (2006) |
| ZhaoEtAl2006SInterNSHMP2008 | |
| ZhaoEtAl2016SInter | Zhao et ál. (2016 b) |
| ZhaoEtAl2016SInterSiteSigma | |

Fuente: autores

**Tabla 27. Ecuaciones pre seleccionadas para eventos de Intraplaca.**

| Nombre | Fuente raíz |
|---|---|
| AbrahamsonEtAl2015SSlab | Abrahamson et ál. (2016) |
| AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh | |
| AbrahamsonEtAl2015SSlabLow | |
| GarciaEtAl2005SSlab | García et ál. (2005) |
| GarciaEtAl2005SSlabVert | |
| Kanno2006Deep | Kanno et ál. (2006) |
| Kanno2006Shallow | |
| LinLee2008SSlab | Lin & Lee (2008) |
| MontalvaEtAl2016SSlab | Montalva et ál. (2017) |
| YoungsEtAl1997GSCSSlabBest | Youngs et ál. (1997) |
| YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit | |
| YoungsEtAl1997GSCSSlabUpperLimit | |
| YoungsEtAl1997SSlab | |
| ZhaoEtAl2006SSlab | Zhao et ál. (2006) |
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 | |
| ZhaoEtAl2016SSlab | Zhao et ál. (2016 c) |
| ZhaoEtAl2016SSlabSiteSigma | |

Fuente: autores

## 5.2 Evaluación de ecuaciones de atenuación

En esta sección se presenta la metodología y los resultados obtenidos del análisis estadístico de las ecuaciones de atenuación preseleccionadas. Dicho análisis fue realizado utilizando los registros de la base de datos compilada en el presente estudio (ver Capítulo 3). Este análisis permite identificar, para cada ambiente tectónico, aquellas ecuaciones con mayor ajuste entre las aceleraciones observadas y las predichas por las ecuaciones de atenuación, así como los porcentajes de participación correspondientes.

Las ecuaciones de atenuación seleccionadas utilizan diferentes mediciones para evaluar la distancia entre la ruptura y el sitio en la que se desea estimar la intensidad del movimiento. Entre los tipos de distancias adoptadas se encuentran las siguientes:

- *Joyner and Boore* ( $R_{JB}$): Representa la distancia horizontal a la proyección de la proyección en superficie de la ruptura
- *Rx*: Distancia horizontal al tope superior de la ruptura
- $R_{rup}$: Distancia más corta al plano de la ruptura
- $R_{hyp}$: Distancia hipocentral

Para evaluar tales distancias, se utilizaron las relaciones de escala generadas por Leonard (2014) para eventos corticales y las relaciones desarrolladas por Strasser et. al (2010) para los ambientes tectónicos de subducción. En Klakamanos et ál. (2011) se presentan recomendaciones para la evaluación de estas distancias. La Figura 75 presenta un esquema de estas distancias.

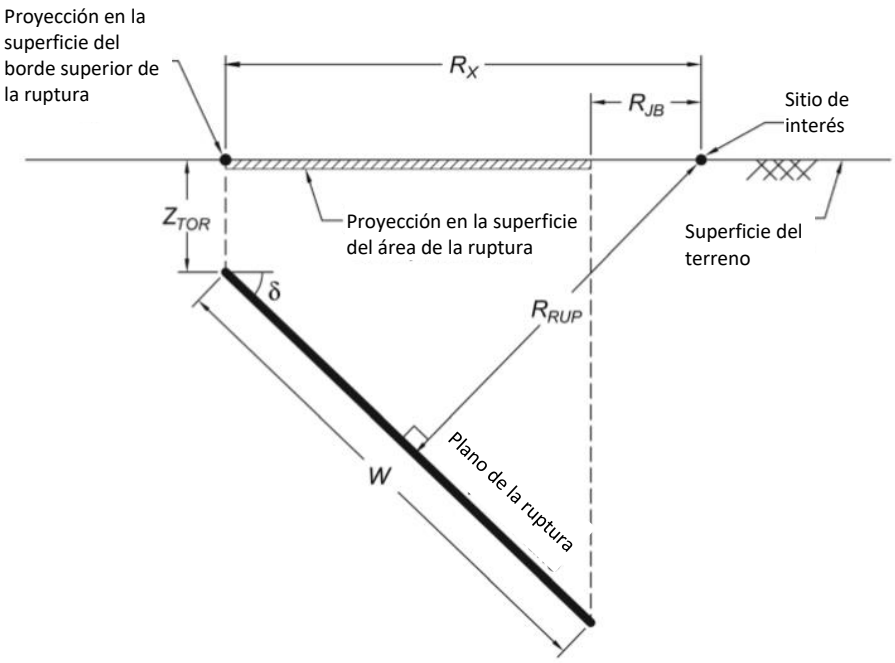



**Figura 75. Tipos de medidas de la distancia entre sitios de análisis y rupturas**

Fuente: Adoptado de Klakamanos et ál. (2011)

Para la evaluación de las ecuaciones de atenuación se utilizaron los siguientes procedimientos: Análisis de residuales; Modelo de Verosimilitud (LH - abreviatura de *likelihood*); Logaritmo de Verosimilitud Normalizado (LLH abreviatura de *log likelihood*); y Ranking Basado en la Distancia Euclidiana (EDR por sus siglas en inglés). En las siguientes secciones se presentan aspectos generales de los procedimientos y criterios de evaluación adoptados. La evaluación se llevó a cabo usando las herramientas de análisis de movimiento fuerte (SMTK) desarrolladas por la Fundación GEM (Weatherill, 2014).

### 5.2.1 Análisis de residuales

En términos generales, un residual representa la diferencia entre un dato observado y uno modelado. En particular, mediante el análisis de residuales se busca evaluar la distribución (de probabilidad) de la diferencia entre las aceleraciones observadas y las calculadas usando ecuaciones de atenuación. Los residuales normalizados se calculan a partir de la siguiente expresión: (Stafford et ál., 2008).

$$Z_{T,ij} = \frac{\log\left(gm_{obs,ij}\right) - \log(gm_{mod,ij})}{\sigma_T} \qquad \text{Ec (5.1)}$$

En donde $Z_{T,ij}$ corresponde al residual normalizado para el registro *i* del evento *j*, $gm_{obs,ij}$ corresponde al valor de la aceleración observada, $gm_{mod,ij}$ corresponde a la aceleración modelada con una cierta ecuación de atenuación y un período estructural definido y $\sigma_T$ corresponde a la desviación estándar propia del modelo

Se considera que una ecuación tiene mejor ajuste cuando la media y la mediana de los residuales son cercanas a 0 y su desviación estándar es cercana a 1. Con el fin de considerar los residuales inter e intra evento se recomienda utilizar la teoría de efectos aleatorios propuesta por Youngs & Abrahamson (1992).

### 5.2.2 Modelo de verosimilitud

El modelo de verosimilitud (Scherbaum et ál., 2004) asume que las ecuaciones de atenuación se pueden describir mediante una distribución lognormal (o una distribución normal del logaritmo de la intensidad del movimiento ln (Y)). Así, para una determinada magnitud M, distancia R y frecuencia F, el valor medio predicho de ln(Y) es μ(M, R, F). La probabilidad de que un valor observado x=ln($Y_x$) esté en el intervalo (x, x+dx) es:

$$dF = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left(\frac{-((x-\mu)^2)}{2\sigma^2}\right) dx \qquad \text{Ec (5.2)}$$

Para cada observación (x) es posible obtener residuales normalizados (z) a partir de la media μ y la desviación estándar σ del modelo, tal como se describe en la Ecuación 5.1.

Bajo estos supuestos, la bondad de ajuste de las ecuaciones de atenuación se evalúa calculando la probabilidad de que el valor absoluto de una muestra aleatoria de los residuales normalizados (z) se encuentre en el intervalo comprendido entre el valor absoluto de una observación particular $|z_0|$ e infinito, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$LH(|z_o|) = \frac{2}{\sqrt{2\,\pi}} \int_{z_o}^{\infty} \exp(\frac{-z^2}{2}) * dz \qquad \text{Ec (5.3)}$$

Dicha evaluación representa la probabilidad de que un residual normalizado sea igual o mayor que $|z_0|$. El valor de LH tiene las siguientes propiedades:

- LH decrece a medida que aumenta la distancia entre las observaciones y la media del modelo. Para $|z_0|=\infty$, LH=0.
- LH puede tener un valor máximo de 1 para $|z_0|=0$, para el cual las observaciones coinciden con el valor medio del modelo.

Para aplicar este método se calculan los residuales normalizados para todas las observaciones de la base de datos de movimiento fuerte y posteriormente se estiman los valores de LH$|z_0|$correspondientes. Por último, se calcula el valor medio del conjunto de valores de LH. El valor medio de LH representa las siguientes características:

- Valores cercanos a 0 indican ajustes deficientes.
- Si la varianza de los datos observados es mayor que la varianza del modelo, el valor promedio de LH es menor que 0.5.
- Si el modelo se ajusta exactamente a los valores observados, el valor medio de LH es 0.5 y los valores de LH se distribuyen equitativamente entre 0 y 1.
- Si la varianza de los datos observados es menor que la variación del modelo, el valor medio de LH es superior a 0.5.

Así, entre mejor sea el ajuste del modelo predictivo del movimiento, el valor medio de LH tiende a acercarse a 0.5. A diferencia del análisis de residuales, el modelo de verosimilitud permite obtener una indicación cuantitativa del ajuste total de la ecuación de atenuación a los datos observados.

### 5.2.3 Modelo del logaritmo de verosimilitud normalizado

A través del modelo del logaritmo de verosimilitud normalizado (LLH) (Scherbaum et ál., 2009), se desea medir la distancia entre dos modelos f y g, descritos mediante las funciones continuas de densidad de probabilidad f(x) y g(x). En este modelo se asume que no se conoce explícitamente la función f(x) pero se conoce una muestra de N valores aleatorios que corresponden al conjunto x={$x_i$} con i=1… N. La verosimilitud del modelo g(x), dada la muestra x es $\mathcal{L}(g|x) = \prod_{i=1}^{N} g(x_i)$. A su vez, el logaritmo de la función de verosimilitud se define como a $log_b(\mathcal{L}(g|x)) = \sum_{i=1}^{N} g(x_i)$.

Entre más cercanos sean los modelos f(x) y g(x), mayor es el logaritmo de la verosimilitud.

*Ajuste por tamaño de la muestra*

Para eliminar la dependencia en el tamaño de la muestra en la valoración de las ecuaciones de atenuación, el logaritmo de la verosimilitud se divide por el número de observaciones (N) con el fin de obtener un valor medio. De esta manera el logaritmo de la verosimilitud normalizado (LLH) se define como:

$$LLH(g) = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} log_b(g(x_i)) \qquad \text{Ec (5.4)}$$

En donde, g(x) corresponde a la función de densidad de probabilidad de los residuales de la ecuación de atenuación evaluada en N puntos de control (N residuales) y b corresponde a la base del logaritmo (se utiliza base 2).

A partir del parámetro LHH es posible calcular los pesos para las diferentes ecuaciones de atenuación a evaluar utilizando la siguiente expresión:

$$w_{gi} = \frac{b^{-LHH(gi)}}{\sum_{k=1}^{K} b^{-LHH(gk)}} \qquad \text{Ec (5.5)}$$

En donde K corresponde al número total de modelos a evaluar y *gi* corresponde a la ecuación de atenuación *i* a comparar. Así, una ecuación de atenuación tendrá un mejor ajuste (tendrá un mayor peso) entre menor sea el parámetro LHH. Bajo esta expresión, la suma total de los pesos debe ser igual a 1. Este enfoque tiene ventajas frente al modelo de verosimilitud (LH) ya que no depende del número de observaciones (se encuentra normalizado) ni de criterios subjetivos para juzgar el ajuste de las ecuaciones.

### 5.2.4 Ranking basado en la Distancia Euclidiana (EDR)

Kale y Akkar (2013) proponen un método de evaluación basado en la Distancia Euclidiana (DE)[3] en el cual el logaritmo de los valores observados del movimiento (a) son valores escalares, y el logaritmo del modelo predictivo (Y) sigue una distribución de probabilidad normal con media $\mu_y$ y desviación estándar $\sigma_y$. Así, para un punto de

[3] La Distancia Euclidiana (DE) se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las diferencias entre N pares de datos (pi,qi) tal que $DE = \sum_{i=i}^{N}(p_i - q_i)^2$. DE siempre representa valores positivos. A mayor valor de DE, mayor diferencia entre los puntos p y q.

análisis (que representa una cierta magnitud, distancia, tipo de falla, tipo de sitio, entre otros), la diferencia (D) entre los logaritmos de los valores observados y los predichos (a-Y) sigue también una distribución normal con media $\mu_D$=a-$\mu_y$ y desviación estándar $\sigma_y$.

Siguiendo la analogía con la DE, la cual siempre representa valores positivos, en este método se considera la distribución de probabilidad de los valores absolutos de D. La probabilidad de que el valor absoluto de D sea menor que un estimador específico *d* se define como: P(|D|< d) = P(D < d)−P(D <−d). Para valores discretos de D, denominados $d_j$, la probabilidad de que |D| sea menor que $|d_j|$ se puede calcular considerando franjas de ancho *dd* alrededor de $d_j$, tal que:

$$p(|D| < |d_j|) = P\left(|D| < \left|d + \frac{dd}{2}\right|\right) - P\left(|D| < \left|d - \frac{dd}{2}\right|\right) \qquad \text{Ec (5.6)}$$

Para efectos prácticos, Kale y Akkar (2013) recomiendan que $|d|_{max} = \max(|\mu_D \pm x\sigma_D|)$, en donde x representa un multiplicador de la desviación estándar

A partir de esta expresión, la probabilidad total de ocurrencia de un conjunto de valores $|d_j|$ (para un punto de análisis) se denomina la Distancia Euclidiana Modificada (MDE) y se estima bajo la siguiente expresión:

$$MDE_d = \sum_{j=1}^{n} |d_j|\, P\big(|D| < |d_j|\big) \qquad \text{Ec (5.7)}$$

En donde n es el número de puntos discretos que depende del ancho de la franja dd.

Para evaluar el ajuste de las ecuaciones de atenuación, los cálculos de la Distancia Modificada Euclidiana (realizados para un solo punto de análisis) deben repetirse para todas las observaciones de la base de datos de movimiento fuerte. Así, al realizar la suma de MDE para un conjunto de N puntos de análisis (pares de observaciones y valores predichos), se obtiene la probabilidad total de las diferencias entre los valores observados del movimiento y los valores estimados mediante las ecuaciones de atenuación. A menores valores de la suma de MDE, se consideran mejores las ecuaciones predictivas del movimiento.

*Ajuste por tamaño de la muestra*

Para eliminar la dependencia en el tamaño de la muestra, la suma de MDE se divide por el número de observaciones (N) con el fin de obtener un valor medio.

*Ajuste según el sesgo del modelo*

Una representación sesgada del movimiento del suelo puede observarse como una tendencia significativa entre los datos observados y el valor medio de las estimaciones. Para cuantificar el sesgo en la predicción de los valores medios se considera un parámetro *k,* que corresponde a la razón entre las siguientes variables:

- MDE $_{original}$: La distancia Euclidiana total entre los valores observados y el valor esperado del movimiento del suelo ($a_i$-Yi);
- MDE $_{corregida}$: La distancia Euclidiana entre los valores observados y los valores del movimiento del suelo, corregidos a través de modelo predictivo derivado mediante una regresión lineal de los datos ($a_i$-$Y_{c,i}$).

Así, el parámetro *k* se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{N}(a_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(a_i - Y_{c,i})^2} \qquad \text{Ec (5.8)}$$

En donde $Y_{c,i} = Y_i - (Y_{fit,i} - a_i)$ y $Y_{fit,i}$ corresponde al valor derivado de la regresión lineal entre $Y_i$ y $a_i$. Así, el parámetro *k* se puede usar para penalizar los modelos predictivos que presenten un mayor sesgo en la estimación de los valores medios. Tal penalización se logra mediante la multiplicación del valor medio de MDE por el parámetro *k*. El valor óptimo de *k* es 1 y ocurre cuando las estimaciones toman valores muy cercanos a las observaciones correspondientes. Mayores valores de *k* indican un sesgo dominante en las estimaciones de la ecuación de atenuación considerada.

Bajo este proceso, el ranking basado en la distancia Euclidiana (EDR) se puede realizar mediante la siguiente expresión:

$$EDR^2 = k * \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} MDE^2{}_i \qquad \text{Ec (5.9)}$$

Así, menores valores de la suma de $EDR^2$, corresponden a ecuaciones predictivas del movimiento con mejores ajustes.

### 5.2.5 Definición de árboles lógicos de ecuaciones de atenuación

Para la selección de las ecuaciones de atenuación (así como para la definición de los pesos del árbol lógico) se consideró como criterio principal el valor del modelo LLH para el rango de periodos estructurales considerado en el presente estudio (entre 0 y 5 segundos, con intervalos cada 0.1 segundos).

Para las ecuaciones de mejor ajuste se realizó también el análisis de residuales, así como la evaluación mediante los modelos de verosimilitud (LH), logaritmo de verosimilitud normalizado (LHH) y el ranking basado en la Distancia Euclidiana normalizada (EDR). Tales análisis se ejecutaron para cada uno de los periodos estructurales con el fin de identificar si los ajustes no varían significativamente entre periodos.

En la Tabla 28 se presenta el resumen de los parámetros evaluados y el rango de valores en que se considera un buen ajuste para cada uno.

**Tabla 28. Parámetros de evaluación**

| Parámetro | Descripción |
|---|---|
| Mediana Residuales | Buen ajuste si es cercano a 0 |
| Media Residuales | Buen ajuste si es cercano a 0 |
| Desviación Residuales | Buen ajuste si es cercano a 1 |
| LH | Buen ajuste si LH es cercano a 1 |
| LLH | Representa mejores ajuste para menores valores de LLH |
| EDR | Buen ajuste si EDR es cercano a 1 |
| k | Buen ajuste si k es cercano a 1 |

Fuente: autores

Usando el parámetro LHH se descartaron ecuaciones de menor ajuste hasta obtener un árbol lógico de tres ramas para cada ambiente tectónico, con un único peso sin discriminar por período estructural.

En las siguientes secciones se presentan, para cada ambiente tectónico, principales resultados de la evaluación y selección de ecuaciones de atenuación. En el Anexo G se presenta un resumen de las propiedades geométricas calculadas con la herramienta SMTK, así como los valores de aceleración pico. A su vez, en el Anexo H se presentan todos los resultados según ambiente tectónico.

#### 5.2.5.1 Resultados obtenidos para Benioff

La Figura 76 presenta, para la zona de Benioff, las relaciones encontradas entre la magnitud Mw y la distancia hipocentral $R_{hyp}$ con respecto a la aceleración pico (PGA) y a la pseudo aceleración de un oscilador con un período de vibración de un segundo. De estos datos se observa una tendencia de las aceleraciones a disminuir con respecto a la distancia hipocentral y a aumentar con respecto a la magnitud del evento, lo cual ratifica la consistencia en los registros utilizados y los parámetros geotécnicos estimados.

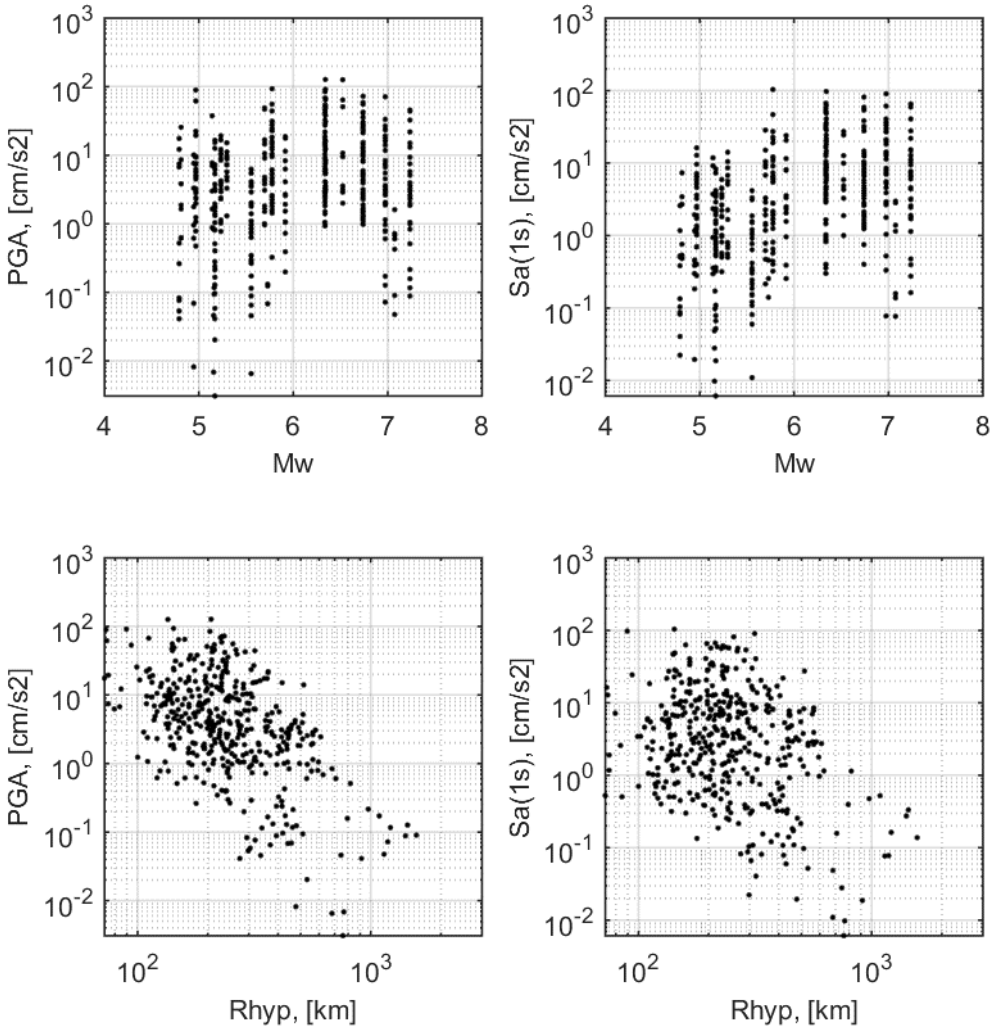



**Figura 76. Datos de movimiento fuerte para la zona de Benioff.**

Fuente: autores

La Figura 77 presenta los resultados de los diferentes modelos aplicados a la base de datos de movimiento fuerte para la zona de Benioff, considerando diferentes periodos estructurales (Te). En esta Figura se incluyen únicamente los resultados de las ecuaciones pre seleccionadas para las cuales se encontró un mejor ajuste según el estadístico LHH.

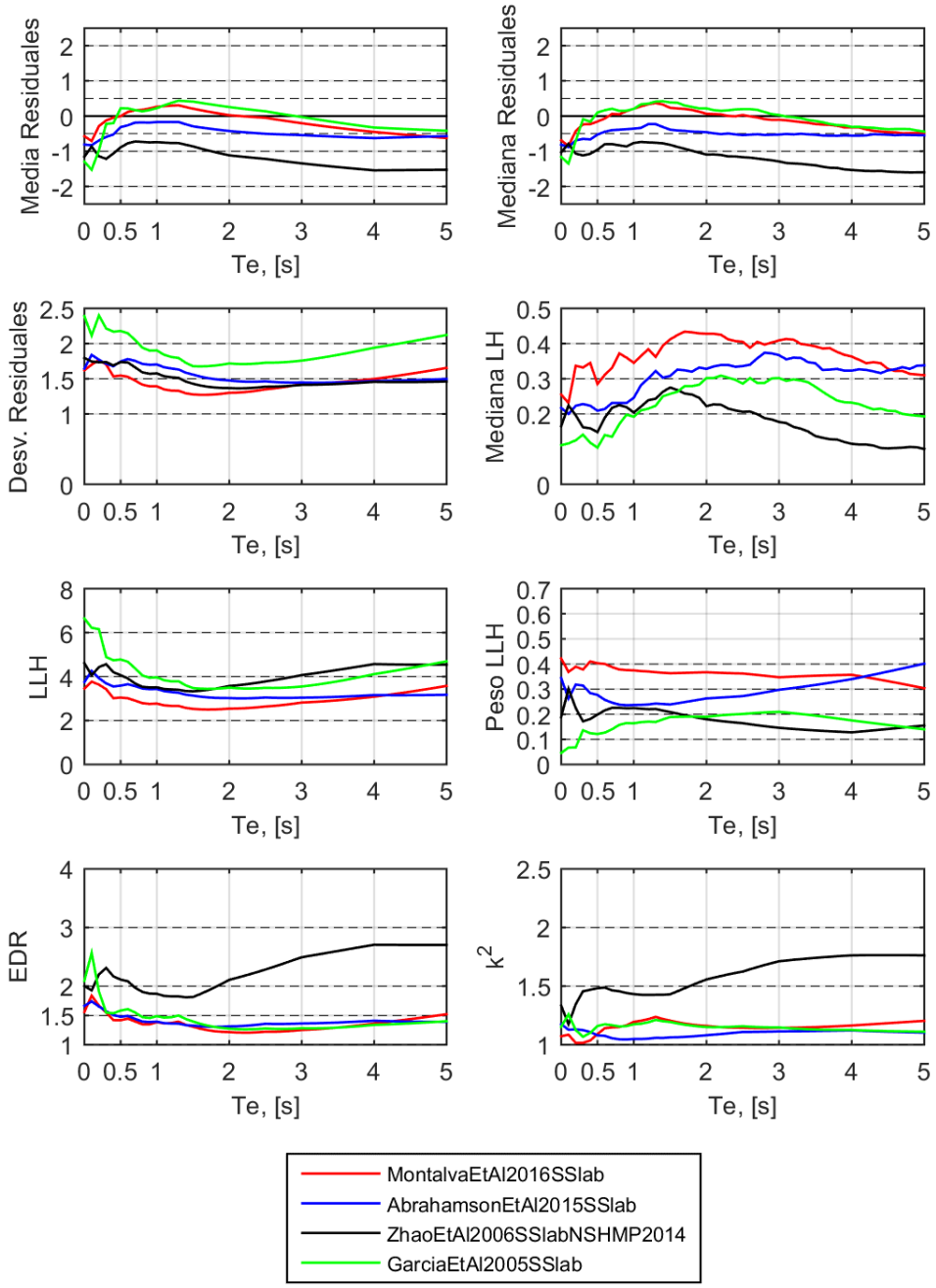



**Figura 77. Resultados estadísticos para la zona de Benioff.**

Fuente: autores

En términos de residuales, las ecuaciones con un mejor ajuste para la media y la mediana fueron los modelos de Montalva et ál. (2017) (modificado), Abrahamson et ál. (2015) y de García et ál. (2005)., mostrando un comportamiento estable para todos los períodos estructurales. De este conjunto, el modelo de García es el que presenta mayores desviaciones.

En términos del LH y el LLH, los modelos con mejor comportamiento a lo largo de todos los períodos estructurales estudiados fueron los modelos de Montalva et ál. (2017; modificado) y el de Abrahamson et ál. (2015). El modelo de Zhao (2006 -

versión modificada en el 2014 para el mapa de amenaza nacional de Estados Unidos) mostró un mejor comportamiento que el de García únicamente para períodos menores a 1.5 segundos, a partir del cual García presenta un mejor ajuste.

En términos del ranking basado en la Distancia Euclidiana (EDR), se observan resultados similares para todos los modelos, exceptuando el de Zhao, en el cual se observan mayores diferencias entre los datos observados y los predichos.

La Tabla 29 presenta los pesos asignados al árbol lógico de ecuaciones de atenuación de la zona de Benioff. Tales valores corresponden al promedio de los pesos obtenidos para el conjunto de periodos de vibración analizado. Individualmente, el peso para cada periodo de vibración se estimó usando la Ecuación 5.5. Este procedimiento se adoptó en los demás ambientes tectónicos.

**Tabla 29. Pesos definitivos para el árbol lógico de ecuaciones de atenuación para la zona de Benioff.**

| Ecuación de atenuación | Peso |
|---|---|
| MontalvaEtAl2016SSlab | 0.424 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab | 0.365 |
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 | 0.210 |

Fuente: autores

### 5.2.5.2 Resultados obtenidos para el Nido Sísmico de Bucaramanga

La Figura 78 presenta, para la zona del Nido de Bucaramanga, las relaciones encontradas entre el valor de magnitud Mw y distancia hipocentral $R_{hyp}$ con respecto al PGA y a la pseudo aceleración para un oscilador con un período de vibración de 1 segundo. De esta Figura se observa la atenuación de los valores de aceleración con respecto a la distancia. En el caso de la magnitud Mw, los valores observados se encuentran concentrados alrededor de valores de 5.0 y 6.2.

La Figura 79 presenta los resultados de los diferentes procesos estadísticos aplicados a la base de datos de movimiento fuerte para la zona del Nido de Bucaramanga. En esta Figura se presentan únicamente los resultados para las ecuaciones con el mejor ajuste según el parámetro LLH.

En la Figura 79 se observa un ajuste sobresaliente del modelo de Zhao et ál. (2006) para períodos bajos (versión modificada). Según los resultados del parámetro LHH, dicha ecuación llega a tener un peso alrededor del 70% para tales períodos. Este ajuste puede evidenciarse igualmente en la media y la mediana de los residuales obtenidos utilizando esta GMPE.

Los otros dos modelos con mejor ajuste fueron el de Abrahamson et ál. (2015) y la versión previa (ajustada) del modelo de Montalva et ál. (2017). Se señala que estos modelos también tienen un adecuado desempeño para la región de Benioff. Según el análisis de residuales normalizados y del parámetro LHH (ver Figura 79) se encuentra

que estos modelos tienen un comportamiento similar. Para ambas ecuaciones se observan mejores ajustes a partir de periodos de 0.5s.

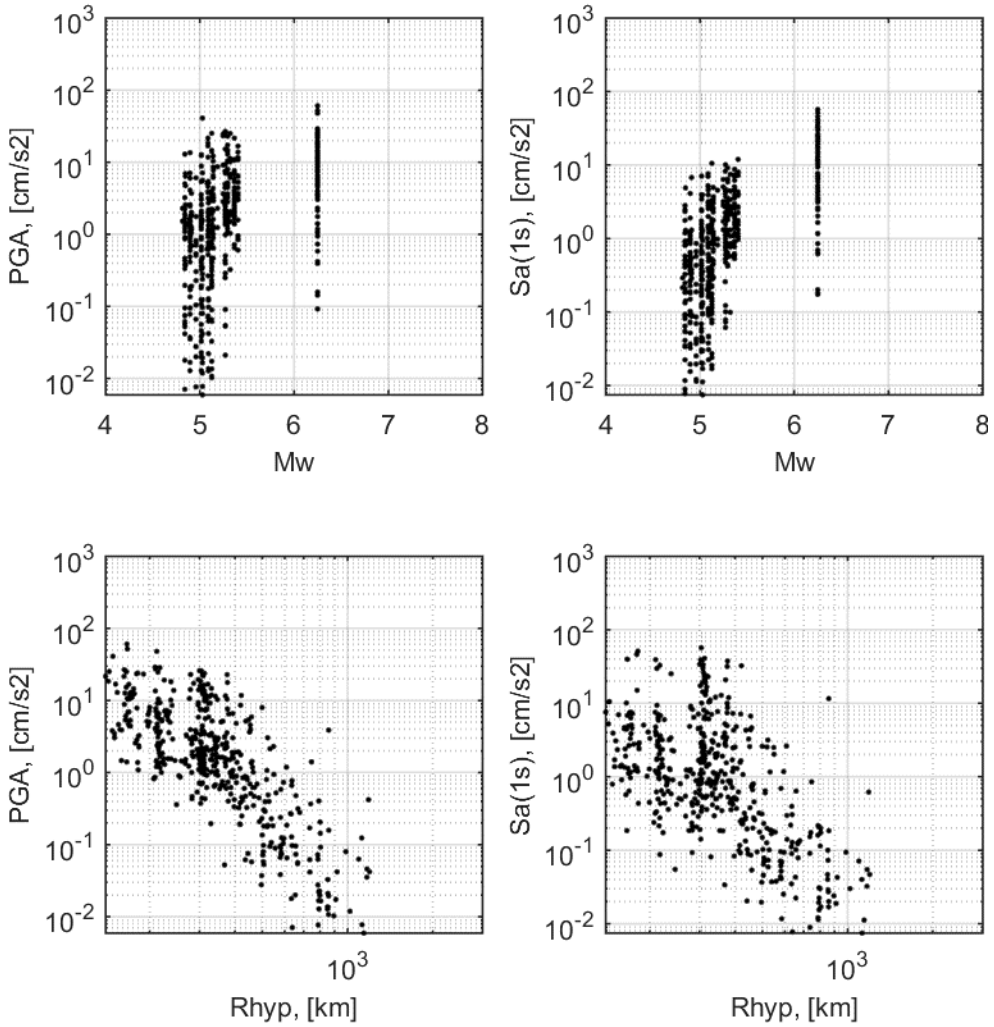



**Figura 78. Datos de movimiento fuerte para el Nido de Bucaramanga.**

Fuente: autores

La Tabla 30 presenta los pesos asignados al árbol lógico de ecuaciones de atenuación del nido sísmico de Bucaramanga.

**Tabla 30. Pesos definitivos para el árbol lógico de ecuaciones de atenuación para el Nido de Bucaramanga.**

| Ecuación de atenuación | Peso |
|---|---|
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 | 0.443 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab | 0.285 |
| MontalvaEtAl2016SSlab | 0.272 |

Fuente: autores

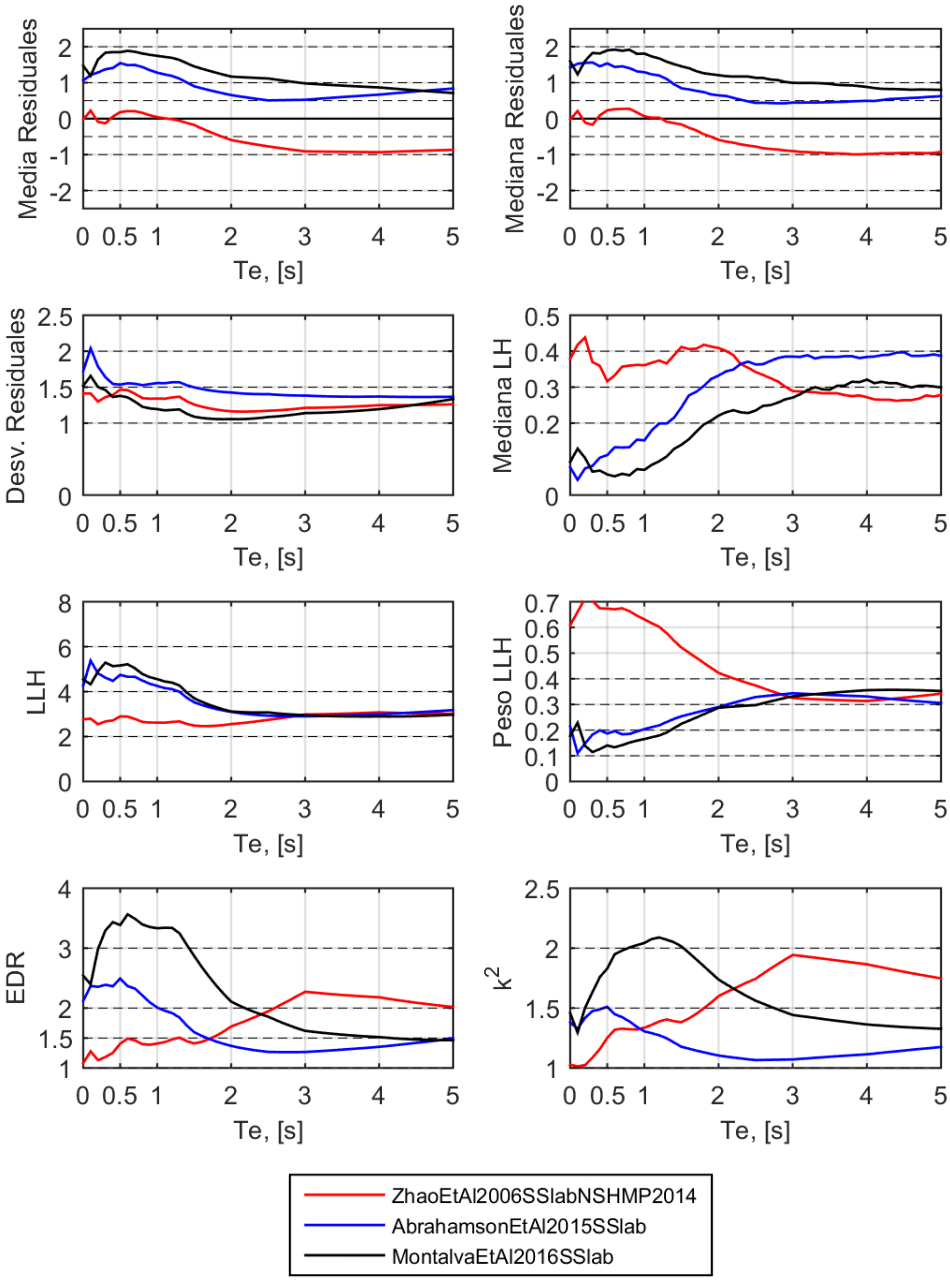



**Figura 79. Resultados estadísticos para el Nido de Bucaramanga.**

Fuente: autores

### 5.2.5.3 Resultados obtenidos para la zona de Interplaca del Pacífico

La Figura 80 presenta las relaciones encontradas para la zona de Interplaca de la subducción del Pacífico Colombiano entre la magnitud Mw y la distancia hipocentral $R_{hyp}$ con respecto al PGA y a la pseudo aceleración para un oscilador con un período de vibración de un segundo (Sa (1s)). Para esta región tectónica se cuenta con un amplio rango de magnitudes que permiten visualizar una relación entre los valores de aceleración y la magnitud Mw de los diferentes eventos.

En la Figura 80 es posible evidenciar una relación de atenuación entre las aceleraciones registradas y la distancia hipocentral. En esta Figura se encuentra una menor dispersión para los valores de PGA que para Sa (1s).

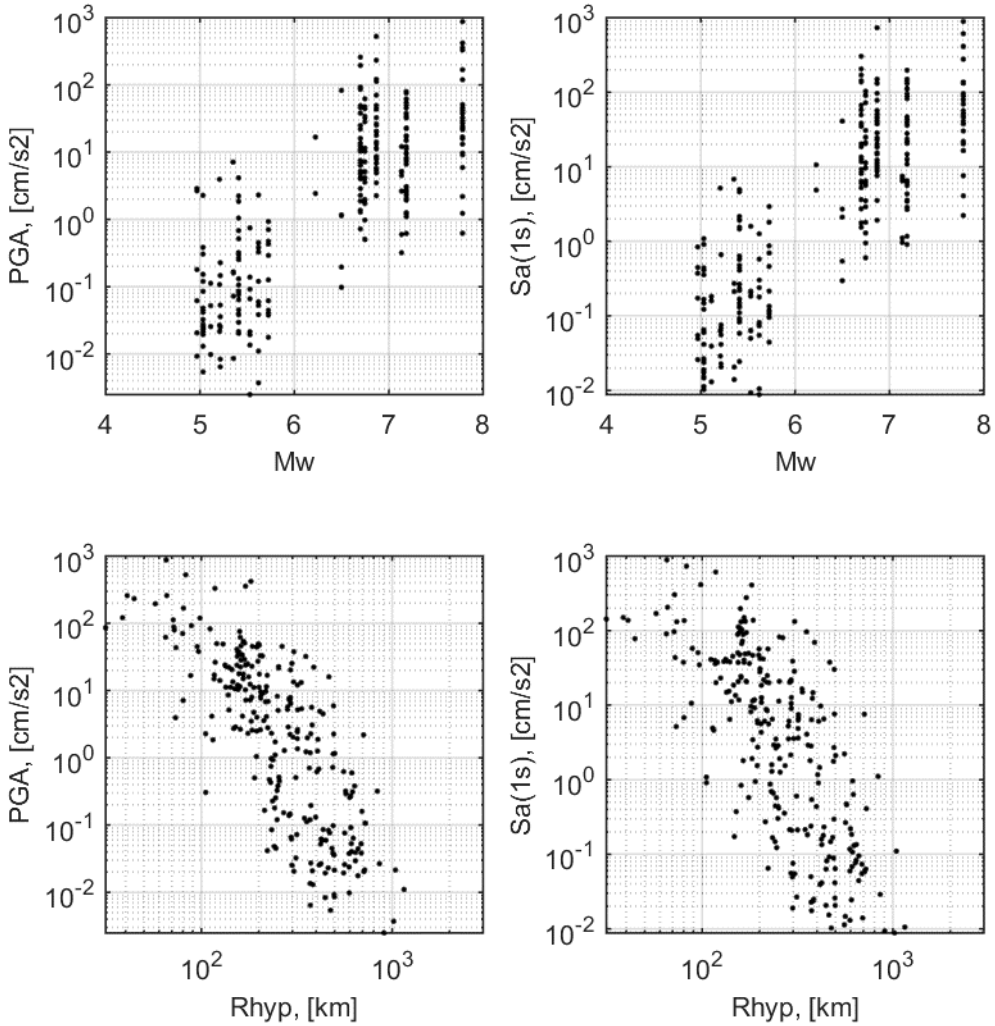



**Figura 80. Datos de movimiento fuerte para la zona de Interplaca**

Fuente: autores

La Figura 81 presenta los resultados de los diferentes estadísticos aplicados a la base de datos de movimiento fuerte para la región de Interplaca dentro de la zona de subducción del Pacífico Colombiano. Los resultados se muestran para las ecuaciones con el mejor ajuste según el parámetro LLH.

En la Figura 81 se observa un buen ajuste de la ecuación propuesta por Abrahamson et ál. (2015), con valores de EDR y de $k^2$cercanos a 1, lo que indica una baja diferencia entre los datos observados y los predichos. A su vez, según el análisis de residuales, el modelo de Abrahamson et ál. (2015) presenta los mejores ajustes y los valores más estables para los periodos de vibración considerados.

Según los parámetros LH y LLH, el modelo propuesto por Zhao et ál. (2006) presenta un buen ajuste para períodos de vibración entre 1 y 2 segundos.

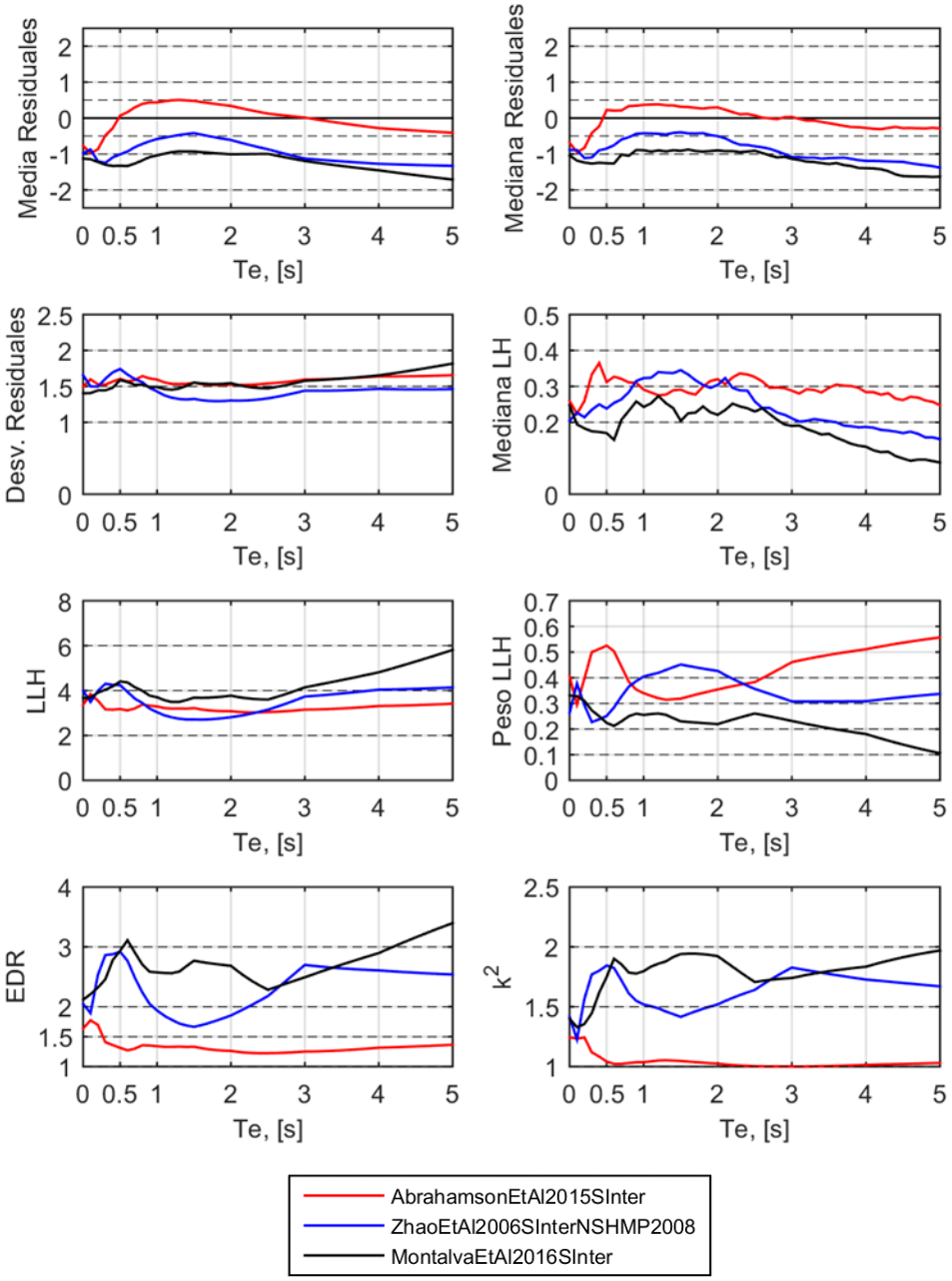



**Figura 81. Resultados estadísticos para la zona de Interplaca**

Fuente: autores

La Tabla 31 se presentan los pesos asignados al árbol lógico de ecuaciones de atenuación de la zona de interplaca del pacífico.

**Tabla 31. Pesos definitivos para árbol lógico de ecuaciones de atenuación para la zona de Interplaca.**

| Ecuación de atenuación | Peso |
|---|---|
| AbrahamsonEtAl2015SInter | 0.437 |
| ZhaoEtAl2006SInterNSHMP2008 | 0.348 |
| MontalvaEtAl2016SInter | 0.215 |

Fuente: autores

### 5.2.5.4 Resultados obtenidos para la zona cortical

La Figura 82 presenta las relaciones encontradas (para la zona cortical) entre el valor de magnitud Mw y distancia hipocentral $R_{hyp}$ con respecto al valor de PGA y a la pseudo aceleración para un oscilador de período de vibración de 1 segundo. De esta Figura se observa una relación atenuación de las aceleraciones con respecto a la distancia hipocentral calculada. A su vez, se observan incrementos en las pseudo aceleraciones espectrales (en especial para periodos de vibración de 1 s) a medida que se aumenta la magnitud de los eventos.

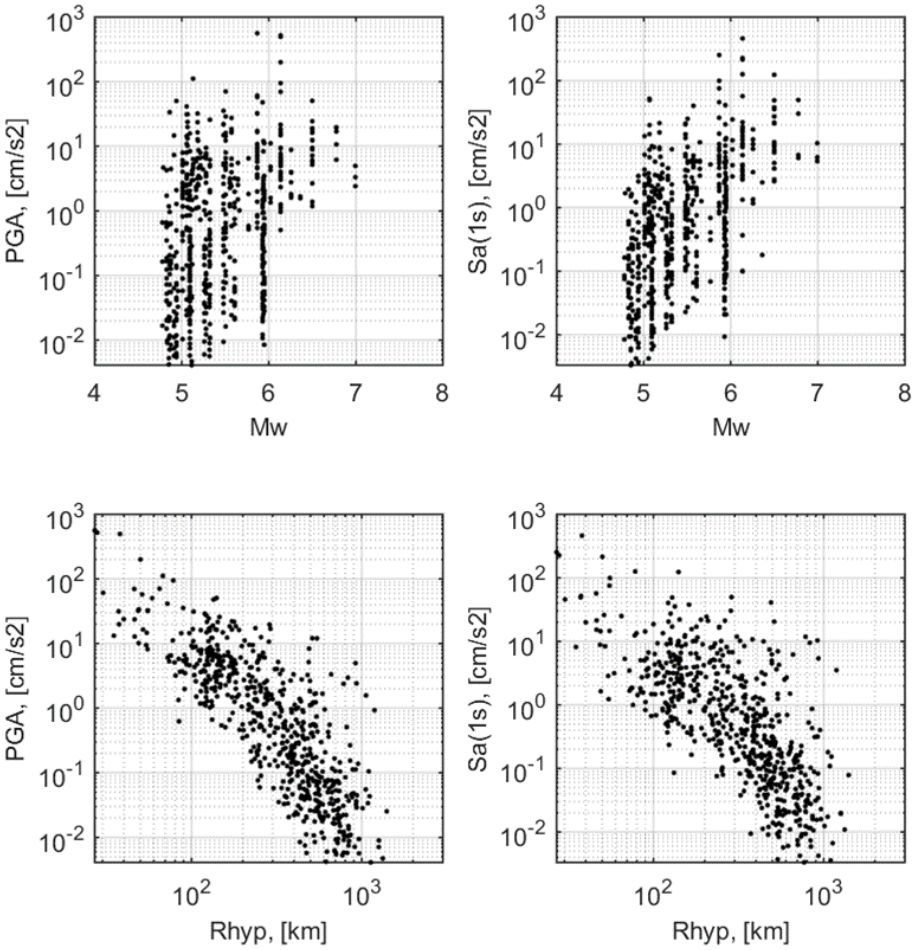



**Figura 82. Datos de movimiento fuerte para eventos corticales**

Fuente: autores

La Figura 83 presenta los resultados de los diferentes estadísticos aplicados a la base de datos de movimiento fuerte para la zona cortical. Para esta región tectónica, el mejor ajuste a los datos observados se obtiene con el modelo de Idriss et. al. (2014). Según el análisis de residuales normalizados, esta relación mostró un desempeño muy estable a lo largo de todos los períodos de vibración (la mediana de los residuales normalizados es cercana a 0). Asimismo, esta ecuación tiene los menores valores del ranking basado en la Distancia Euclidiana (EDR) para períodos de vibración superiores a 0.5 s (ver Figura 83).

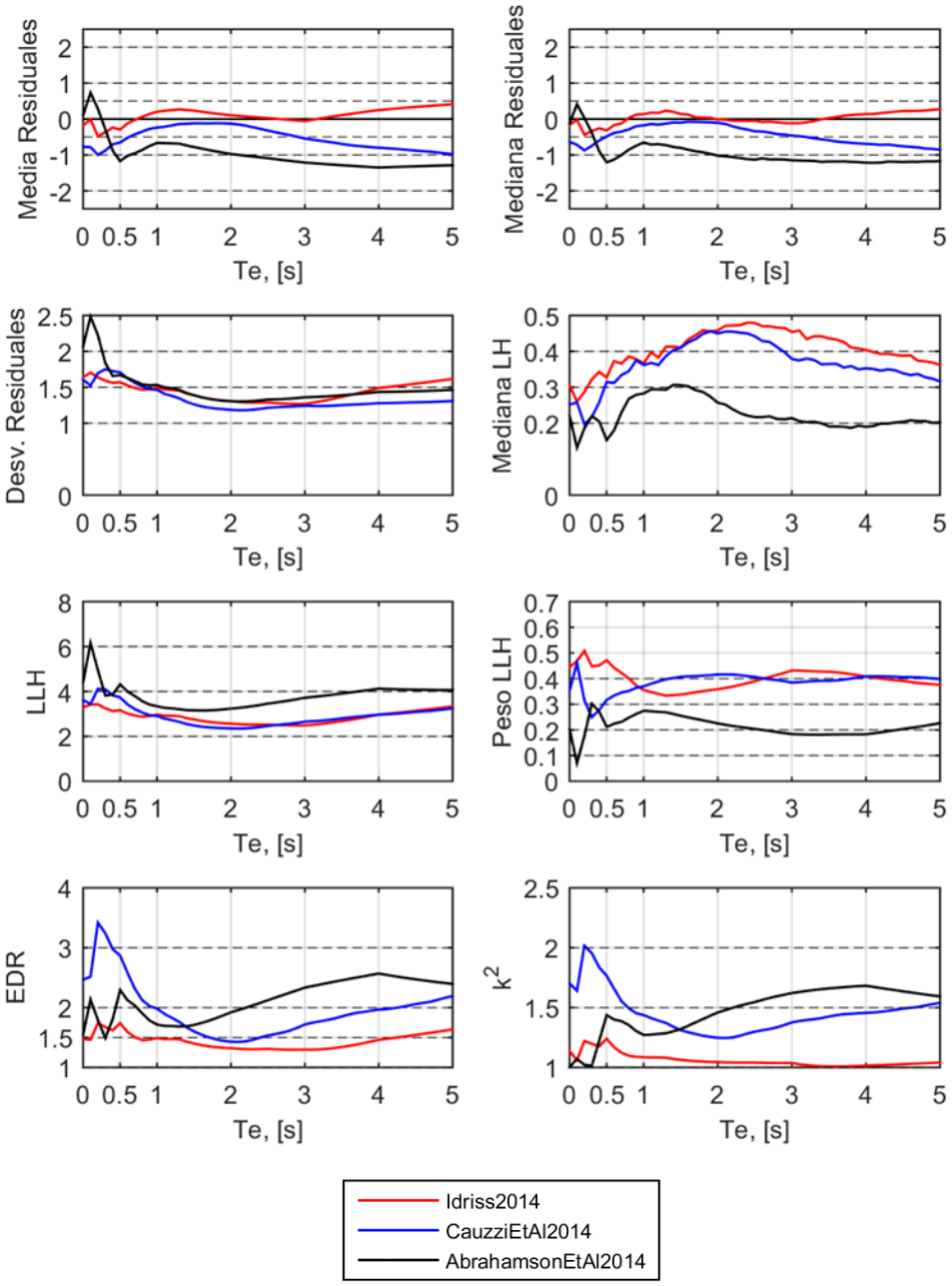



**Figura 83. Resultados estadísticos para eventos corticales.**

Fuente: autores

Según el análisis de los parámetros LH y LHH, las ecuaciones de atenuación de Cauzzi et. al (2014) y de Idriss et ál. (2014) tienen un comportamiento similar y su ajuste a los datos observados es mejor que el obtenido usando el modelo de Abrahamson et ál. (2014). La Tabla 32 presenta los pesos asignados al árbol lógico de ecuaciones de atenuación de la zona cortical.

**Tabla 32. Pesos definitivos para el árbol lógico de ecuaciones de atenuación para eventos corticales.**

| Ecuación de atenuación | Peso |
|---|---|
| Idriss2014 | 0.399 |
| CauzziEtAl2014 | 0.389 |
| AbrahamsonEtAl2014 | 0.211 |

Fuente: autores

# 6. CÁLCULO DE LA AMENAZA SÍSMICA

De forma general, un modelo de amenaza sísmica permite cuantificar las acciones sísmicas (p.e. intensidades, aceleraciones espectrales, entre otros parámetros de medición) a las cuales se encuentra expuesta la población y la infraestructura.

En este estudio se adopta un enfoque probabilista, en el cual, la amenaza sísmica se evalúa como la probabilidad con que un cierto valor de amenaza, definido por un parámetro del movimiento del terreno (i.e. aceleración pico – PGA), es superado (excedido) en un determinado sitio o región de estudio, considerando una ventana de observación (t) dada (Cornell, 1968).

En la siguiente expresión se define genéricamente el concepto anteriormente expuesto:

$$H = P[x(s) \geq x_0\,;t] \qquad \text{Ec (6.1)}$$

En dónde la amenaza (H) viene representada por medio de una función de probabilidad del parámetro que indica la intensidad del movimiento del terreno, ***x***, en un sitio determinado (s); donde $Px(s) \geq x_0$ representa la probabilidad de superación de un umbral $x_0$ del parámetro elegido durante una ventana de observación (t).

Usualmente, la amenaza sísmica se expresa a través de los siguientes resultados:

*Curvas de amenaza*: permiten identificar, para un sitio dado, la probabilidad de que sean excedidas un conjunto de valores de intensidades del movimiento, considerando una ventana de observación (t). Así, en sitios de mayor peligro, existe una mayor probabilidad de que un determinado valor de intensidad del movimiento sea excedido. Estas curvas son útiles para identificar las acciones sísmicas que pueden afectar a los elementos expuestos, considerando diferentes niveles de seguridad (o periodos de retorno).

*Espectros de amenaza uniforme:* Estas curvas contienen, para un sitio determinado y para un periodo de retorno dado, los valores de aceleración espectral estimados para diferentes periodos de vibración. Estos resultados son útiles para identificar las acciones sísmicas que pueden afectar a las construcciones expuestas, según sus periodos estructurales.

*Mapas de amenaza*: corresponden a la distribución geográfica de una determinada intensidad del movimiento, para un determinado periodo de retorno. Por ejemplo, es posible obtener mapas de aceleración espectral para periodos de vibración de un segundo (Sa (1s)), para un periodo de retorno de 475 años.

La evaluación de la amenaza en roca firme ($V_s$ 760 m/s) se llevó a cabo usando el motor de cálculo OpenQuake (Pagani et ál. 2014 a) En este capítulo se describe la metodología adoptada y los principales componentes del modelo de amenaza. Más información acerca de los procedimientos de cálculo de amenaza sísmica usando OpenQuake se pueden consultar en Pagani et ál. (2014 b).

## 6.1 Metodología para la estimación de la amenaza sísmica

Para evaluar la amenaza sísmica, en este estudio se adoptan las metodologías propuestas por Budnitz et ál. (1997), Reiter (1991) y McGuire (2004). El principal objetivo del análisis es estimar, para un sitio determinado, la probabilidad de excedencia de diferentes intensidades del movimiento del suelo, considerando todos los sismos que puedan ocurrir.

Entre los principales supuestos se encuentran los siguientes:

- La sismicidad en una región (o sitio) viene caracterizada por un grupo de fuentes sísmicas independientes, lo que significa que la ocurrencia de un evento en una fuente no afecta la probabilidad de ocurrencia de un evento en las otras fuentes
- Cada fuente sísmica es capaz de generar rupturas (sismos) independientes, por lo tanto, la ocurrencia de una ruptura en una fuente no afecta la probabilidad de ocurrencia de otra potencial ruptura en la misma fuente sísmica.

### 6.1.1 Componentes del modelo de amenaza

Los principales componentes del modelo de amenaza sísmica son los siguientes:

- *Árbol lógico de fuentes sísmicas*: corresponde a un conjunto de fuentes sísmicas, caracterizadas según su ambiente tectónico, geometría y parámetros de sismicidad. El árbol lógico de fuentes consta principalmente de dos modelos (b1 y b2), creados según las alternativas consideradas en la definición y caracterización de las fuentes. Por ejemplo, en el modelo de sismicidad superficial se consideran tres tipologías de fuente: tipo área, fallas activas, o puntuales.
  Por otro lado, para el modelo de subducción, cambios en la definición de la geometría de las fuentes han sido utilizadas para representar modelos alternativos y la incertidumbre epistémica asociada. En el capítulo 4 del presente estudio se presentan detalles sobre las fuentes sísmicas. En laTabla 33 se presenta un esquema del modelo de fuentes.

- *Árbol lógico de ecuaciones de atenuación:* Corresponde al conjunto de ecuaciones seleccionadas para cada ambiente tectónico (ver Tabla 34). Tales ecuaciones permiten estimar, para un sitio determinado, las intensidades del movimiento esperadas dada la ocurrencia de un sismo de una cierta magnitud y a una cierta distancia. Detalles de la selección de estas ecuaciones se presentan en el Capítulo 5 del presente estudio.

**Tabla 33. Modelo de fuentes sísmicas**

| Tipo de fuente / Modelo | Modelo (b1) Peso: 40% | Modelo (b2) Peso: 60% |
|---|---|---|
| Fuentes corticales | - Fuentes tipo falla (fallas activas).<br>-Modelo de sismicidad suavizada | -Fuentes tipo área. Modelo de sismicidad equiprobale |
| Fuentes interplaca del proceso de subducción del pacífico | -Fuentes complejas. Profundidad de fuentes: 50 km; no segmentado | -Fuentes complejas. Profundidad de fuentes: 40 km; modelo segmentado |
| Zona de Benioff (proceso de subducción del pacífico) | Fuentes paramétricas. Profundidad de fuentes: 50 km | Fuentes paramétricas. Profundidad de fuentes: 40 km |
| Nido sísmico de Bucaramanga | Fuentes no paramétricas | Fuentes no paramétricas |

Fuente: autores

**Tabla 34. Árbol lógico de ecuaciones de atenuación para cada ambiente tectónico**

| Fuentes corticales (superficiales) | | |
|---|---|---|
| **Ecuación de atenuación** | **Peso** | **ID** |
| Idriss2014 (Idriss, 2014) | 0.399 | b11 |
| CauzziEtAl2014 (Cauzzi et ál., 2014) | 0.389 | b12 |
| AbrahamsonEtAl2014 (Abrahamson et ál., 2014) | 0.211 | b13 |

| Subducción - Interplaca | | |
|---|---|---|
| **Ecuación de atenuación** | **Peso** | **ID** |
| AbrahamsonEtAl2015SInter (Abrahamson et ál., 2016) | 0.437 | b31 |
| ZhaoEtAl2006SInterNSHMP2008 (Zhao et ál., 2006) | 0.348 | b32 |
| MontalvaEtAl2016SInter (Montalva et ál., 2017) modificada | 0.215 | b33 |

| Nido de Bucaramanga (Intraplaca) | | |
|---|---|---|
| **Ecuación de atenuación** | **Peso** | **ID** |
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 (Zhao et ál., 2006) | 0.443 | b21 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab (Abrahamson et ál., 2016) | 0.285 | b22 |
| MontalvaEtAl2016SSlab (Montalva et ál., 2017) modificada | 0.272 | b23 |

| Benioff (Intraplaca) | | |
|---|---|---|
| **Ecuación de atenuación** | **Peso** | **ID** |
| MontalvaEtAl2016SSlab (Montalva et ál., 2017) modificada | 0.424 | b41 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab (Abrahamson et ál., 2016) | 0.365 | b42 |
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 (Zhao et ál., 2006) | 0.21 | b43 |

Fuente: autores

**Nota**: Los acrónimos de las ecuaciones de atenuación presentadas en la Tabla 34 son referidos al motor de cálculo de OpenQuake.

### 6.1.2 Fuentes de incertidumbre en la evaluación de la amenaza sísmica

La naturaleza aleatoria de los procesos dinámicos asociados al origen de los sismos y a la propagación de sus ondas, sumado a la falta de datos y de conocimiento de tales procesos, limitan la posibilidad de estimar de manera exacta las intensidades del movimiento del terreno ante la ocurrencia de sismos. En este contexto, una evaluación probabilista es una alternativa para estimar valores esperados, así como rangos de variación de las intensidades del movimiento. Siguiendo este enfoque, las

intensidades del movimiento se consideraron como una variable aleatoria, cuyas principales fuentes de incertidumbre se describen a continuación.

*Incertidumbres aleatorias:* Corresponden a la variación de los datos que describen la ocurrencia de sismos y la intensidad del movimiento.

- *Incertidumbre en las tasas de ocurrencia de los sismos*: Como se señaló en el capítulo de fuentes sísmicas, para cada fuente se determina una distribución de recurrencia de magnitudes. A su vez, la ocurrencia de sismos se modela mediante una distribución de Poisson. De esta manera, es posible estimar para una fuente determinada, la probabilidad de ocurrencia de sismos de determinadas magnitudes en una ventana de tiempo específica.
- *Incertidumbre en la estimación de la intensidad del movimiento:* En términos generales, para las ecuaciones de atenuación seleccionadas se considera que la intensidad del movimiento es una variable aleatoria que sigue una distribución de probabilidad lognormal, descrita mediante un valor medio y una desviación estándar. De esta manera, es posible calcular la probabilidad de que se exceda un determinado valor de intensidad del movimiento, dado que ocurre un sismo de ciertas características (magnitud, distancia, entre otras).

*Incertidumbres epistémicas:* Corresponden a la falta de conocimiento en la modelación de la amenaza. Para enfrentar esta limitación se proponen diferentes alternativas para modelar las fuentes sísmicas, así como diferentes ecuaciones de atenuación para calcular la intensidad del movimiento. De la articulación entre el árbol lógico de fuentes con el árbol lógico de ecuaciones de atenuación se obtiene un conjunto de casos de análisis (realizaciones), para los cuales es posible estimar sus pesos respectivos (ver Figura 84).

### 6.1.3 Evaluación de curvas de amenaza

Una curva de amenaza representa la probabilidad de que sea excedida una determinada aceleración espectral en un periodo de observación dado. Para un sitio determinado, la estimación de curvas de amenaza comprende los siguientes pasos:

*Identificación de casos de análisis:* para una determinada ruptura, perteneciente a un cierto ambiente tectónico, es posible utilizar diferentes ecuaciones de atenuación. Por ejemplo, para las fuentes corticales se pueden utilizar las ecuaciones b11, b12 y b12 (ver Tabla 34).

Para un determinado sitio, una de las posibles realizaciones (casos de cálculo intensidades del movimiento) puede ser la que resulta de la combinación entre el modelo de fuentes b1, usando las ecuaciones de atenuación b11 (superficial), b21 (nido de Bucaramanga), B31, (zona Benioff) y B41 (zona interplaca del pacífico). El peso correspondiente a este caso de análisis es x1. xb11. xb21 . xb31 . xb41. Este caso corresponde a la primera rama de la Figura 84.

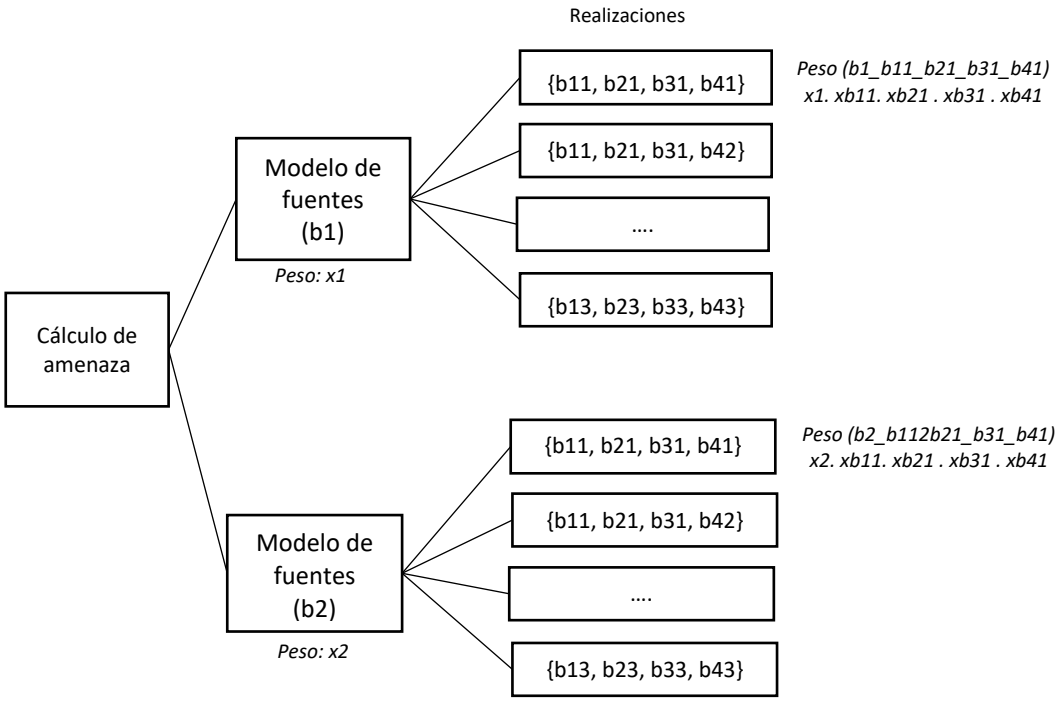



**Figura 84. Realizaciones para la estimación de la amenaza sísmica**

Fuente: autores

Con el fin de considerar todos los casos posibles, las intensidades del movimiento se estiman para todo el conjunto de combinaciones que resultan entre ambientes tectónicos y ecuaciones de atenuación.

Para un determinado sitio, el número de realizaciones n (ramas del árbol lógico del cálculo de amenaza) puede estimarse como $n=Mf \times At^{EA}$ en donde Mf es el número de ramas del modelo de fuentes (dos en este caso; b1, b2), At es el número de ambientes tectónicos que influyen en el cálculo de la amenaza y EA corresponde al número de ecuaciones de atenuación por cada ambiente tectónico. Por ejemplo, sí para un punto influyen rupturas de 3 ambientes tectónicos, considerando 3 ecuaciones de atenuación por ambiente tectónico, el número de realizaciones que se obtienen es de $54 = 2*3^3$.

El número de ambientes y de fuentes que influyen en el cálculo de amenaza está sujeto a la distancia entre la localización de las rupturas y el sitio de análisis. En este sentido, es posible que se descarten rupturas muy lejanas que no tengan mayor influencia en el cálculo de las intensidades del movimiento. En el caso que existiera un solo modelo de fuentes y sólo existiera una ecuación de atenuación (según ambiente tectónico) el procedimiento de cálculo resulta más sencillo.

*Creación de un listado de rupturas*: A partir del árbol lógico de fuentes sísmicas se genera una lista de rupturas (sismos), acordes con los parámetros de sismicidad de tales fuentes. Asimismo, para cada ruptura se identifica su correspondiente probabilidad de ocurrencia, según la ventana de observación establecida para el análisis.

*Evaluación de la probabilidad de excedencia de intensidades del movimiento*: a partir de la lista de rupturas (obtenidas en el paso anterior) y del árbol lógico de ecuaciones de atenuación, se obtienen, para cada ruptura, intensidades del movimiento esperadas en el sitio de análisis.

Bajo el supuesto de independencia de las rupturas (y asumiendo que la ocurrencia de sismos sigue una distribución de Poisson) se estima la probabilidad de excedencia de intensidades del movimiento, usando la expresión sugerida por Field et ál. (2003), la cual se encuentra implementada en el motor de cálculo OpenQuake (Pagani et ál., 2014 b):

$$P(X \geq x|t) = 1 - \prod_{i=1}^{I} \prod_{j=1}^{J} (1 - P_{rupi,j}(n \geq 1|t)^{P(X \geq x|rupi,j)} \qquad \text{Ec. (6.2)}$$

En donde, X corresponde al parámetro de intensidad del movimiento, $P_{rupi,j}(n \geq 1|t)$, corresponde a la probabilidad de que ocurra al menos una ruptura j en la fuente i, en la ventana de observación t; $P(X \geq x|rupi,j)$ corresponde a la probabilidad de que el parámetro de intensidad sea mayor que un valor x dado que ocurre una ruptura j en la fuente i (según las ecuaciones de atenuación). Detalles sobre este procedimiento de cálculo se encuentran en (Pagani et ál., 2014 b).

Las probabilidades de excedencia estimadas mediante la Ecuación 6.2 corresponden a una realización según el modelo de fuentes sísmicas (utilizado para la generación de rupturas) y las ecuaciones de atenuación utilizadas para el cálculo de intensidades del movimiento. Así, con el fin de considerar todos los casos posibles, tales cálculos se ejecutan para el total de realizaciones descritas en la Figura 84 y se ponderan según los pesos correspondientes.

Bajo este procedimiento, es posible estimar el valor esperado, así como diferentes percentiles de las probabilidades de excedencia de la intensidad del movimiento. En particular, el valor esperado se puede obtener como la suma ponderada de los resultados de todas las realizaciones, considerando sus pesos correspondientes. La Figura 85 presenta un esquema de los componentes y principales actividades del cálculo de probabilidades de excedencia del movimiento.

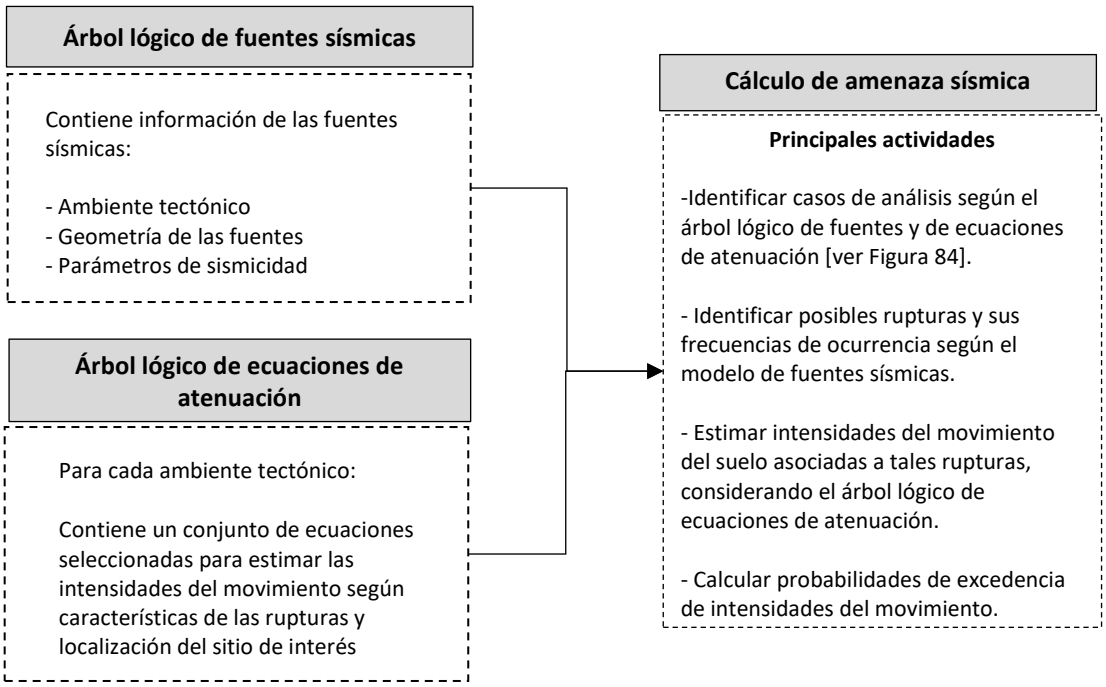



**Figura 85. Componentes del cálculo del modelo de amenaza sísmica**

Fuente: autores

### 6.1.4 Estimación de espectros de amenaza uniforme y mapas de amenaza

Los espectros de amenaza uniforme representan las aceleraciones espectrales esperadas, para diferentes periodos de vibración, considerando un determinado periodo de retorno (o probabilidad de excedencia en un tiempo determinado).

Para un sitio particular, los espectros de amenaza uniforme pueden obtenerse a partir del siguiente procedimiento:

(i) Definir las condiciones del análisis: establecer una probabilidad de excedencia (PE); por ejemplo, PE anual de 0.002105, que corresponde a un periodo de retorno de 475 años; determinar un conjunto de periodos de vibración {0s, 0.1s, 0.2s, … ns} y de aceleraciones espectrales de interés {PGA, Sa (0.1s), Sa (0.2s) … Sa (ns)}.

(ii) Calcular las curvas de amenaza correspondientes a cada periodo de vibración.

(iii) Consultar, (en las curvas de amenaza obtenidas), los valores de las aceleraciones espectrales correspondientes a la probabilidad de excedencia (PE).

Por su parte, los mapas de amenaza representan, para un determinado periodo de vibración T y para una determinada PE, los valores de las aceleraciones espectrales correspondientes en un conjunto de sitios de interés. Así, los mapas de amenaza pueden generarse mediante el siguiente procedimiento:

(i) Definir las condiciones del análisis: establecer un conjunto de sitios de análisis {s1, s2, …, sn}, una probabilidad de excedencia PE y un periodo de vibración T.
(ii) Para cada punto del análisis, calcular curvas de amenaza para la intensidad del movimiento (Sa (T)) deseada.
(iii) Para cada punto de análisis, consultar (en la curva de amenaza respectiva) los valores de intensidad del movimiento (Sa (T)) correspondientes a la PE establecida.

## 6.2 Requerimientos computacionales

El modelo nacional de amenaza sísmica (elaborado mediante la colaboración SGC – GEM), está compuesto por un conjunto de archivos en los que se definen los árboles lógicos de fuentes sísmicas y de ecuaciones de atenuación. Dichos archivos están organizados según los formatos establecidos para el cálculo de amenaza usando el motor de cálculo OpenQuake (versión 3.2). Estos insumos se encuentran abiertos al público para consulta mediante solicitud al SGC.

Para cada fuente sísmica se cuenta con un archivo en el que se definen la geometría y los parámetros de sismicidad correspondientes. Tales parámetros se establecen según el tipo de fuente (puntual, tipo área, falla, fuente compleja y no paramétrica). Una descripción de los parámetros requeridos para cada tipo de fuente se encuentra en el capítulo 4. Mayores detalles respecto a la modelación de las fuentes se encuentran en GEM (2018).

Por otro lado, las ecuaciones de atenuación seleccionadas para el modelo de amenaza sísmica de Colombia se encuentran programadas en el motor de cálculo OpenQuake. De esta manera, no hace falta definir tablas de parámetros o rutinas de cálculo adicionales. Las ecuaciones de atenuación implementadas en OpenQuake pueden consultarse en el repositorio de GEM (GEM s/f).

Para análisis posteriores y en caso que se considere necesario, es posible incluir otras ecuaciones de atenuación con el fin de llevar a cabo el cálculo de intensidades del movimiento, siguiendo los formatos establecidos para el uso del motor de cálculo OpenQuake.

El cálculo de la amenaza sísmica nacional se puede realizar en computador de 64 bits, con 8 procesadores principales (16 procesadores lógicos) de 3.70 GHz de velocidad, con una memoria RAM de 32 GB. En un equipo de estas características, la estimación de curvas de amenaza, para un tipo de intensidad del movimiento (por ejemplo, PGA), para una malla de 7500 sitios que cubre el territorio colombiano, tiene una duración aproximada de 10 horas.

# 7. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE AMENAZA SÍSMICA

El principal objetivo de este estudio es estimar, para un conjunto de puntos del país, las probabilidades de que se excedan determinadas intensidades del movimiento del terreno durante un periodo de exposición específico (por ejemplo 50 años).

Para la estimación de dichas probabilidades de excedencia se elaboraron un árbol lógico de fuentes sísmicas y un árbol lógico de ecuaciones de atenuación. Mediante las fuentes sísmicas se busca caracterizar el territorio en términos de la distribución geográfica de los eventos, la magnitud máxima que pueden generar y la frecuencia de ocurrencia de sismos según sus magnitudes. Por otro lado, las ecuaciones de atenuación son útiles para estimar las aceleraciones espectrales esperadas en el territorio ante la ocurrencia de sismos. Detalles de las fuentes sísmicas, de las ecuaciones de atenuación y de la metodología de cálculo de amenaza se presentan en los capítulos 4, 5 y 6, respectivamente.

En este capítulo se presentan principales resultados de la evaluación de la amenaza sísmica nacional, en términos de mapas de aceleraciones pico para diferentes periodos de retorno, curvas de amenaza, espectros de amenaza uniforme y desagregaciones de la amenaza.

## 7.1 Mapas de amenaza en roca firme

Los mapas de amenaza contienen, para un conjunto de puntos, las aceleraciones espectrales esperadas para un periodo de retorno establecido. La Figura 86, la Figura 87 y la Figura 88 presentan aceleraciones pico (PGA) estimadas para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años, respectivamente.

En términos generales, las anteriores figuras presentan una distribución geográfica similar en cuanto a las zonas en las que se esperan mayores aceleraciones para los periodos de retorno analizados, destacándose el pacífico colombiano, el eje cafetero, el borde llanero, así como los departamentos de Arauca, Norte de Santander y Santander. A continuación, se presentan algunas observaciones sobre la distribución de la amenaza en el territorio nacional.

*Pacífico colombiano*

En la Figura 86 se observa que, para un periodo de retorno de 475 años, los valores de PGA en su mayoría varían entre 0.4 y 0.6 g a una distancia cercana a 100 km de la costa pacífica. Los sitios de mayor PGA (0.6 – 0.9 g) se encuentran hacia el sur, en el departamento de Nariño (cerca de Tumaco, Francisco Pizarro y Mosquera), así como hacia el noroccidente del departamento de Chocó (cerca a bahía Solano). En zonas más alejadas de la costa pacífica (entre 100 y 200 km) se estiman aceleraciones en un rango entre 0.2 y 0.4 g.

Entre los eventos más relevantes que han ocurrido en el pacífico colombiano se encuentran los sismos de 1906 de magnitud 8.8 Mw (cerca de Tumaco, a una profundidad de 20 km) y el de 1976 de magnitud 7.3 Mw (cerca de Bahía Solano, de profundidad 17.5 km). Eventos de características similares han ocurrido en la costa ecuatoriana, tal como el sismo de 2016 de magnitud 7.8 Mw (cerca a Pedernales, de profundidad 20 km). Estos eventos son ejemplos del potencial de generación de sismos de la subducción del pacífico, así como de su contribución a la amenaza en dicha zona y de los cuantiosos daños que pueden llegar a ocasionar.

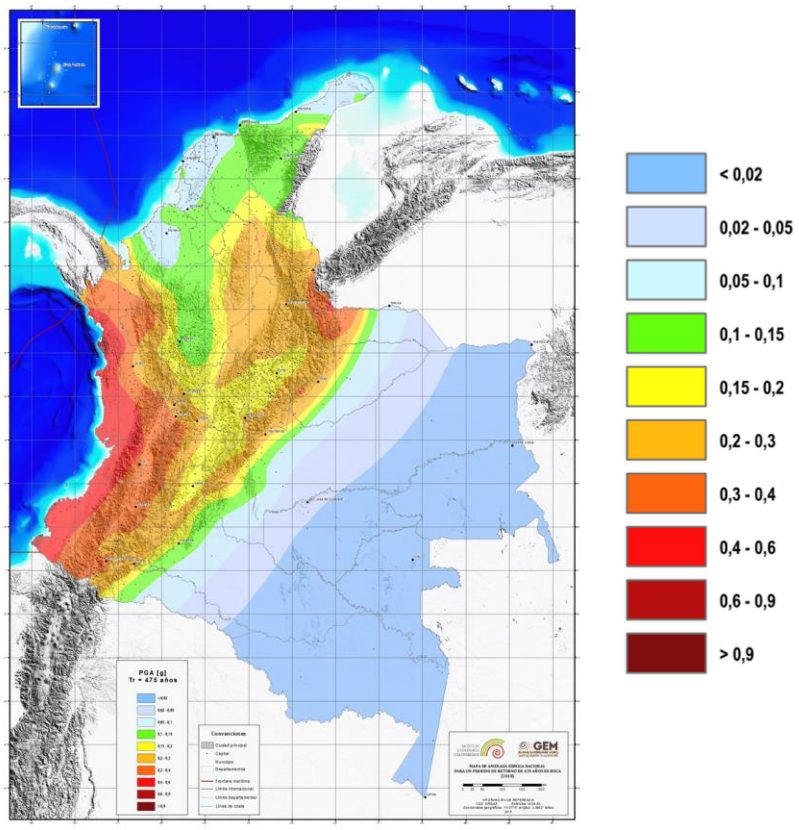



**Figura 86. Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 475 años**

Fuente: autores

*Eje cafetero*

En los departamentos del eje cafetero (Quindío, Caldas, Risaralda), localizados a más de 150 km de la costa pacífica, se estiman aceleraciones que varían entre 0.15 y 0.3g para un periodo de retorno de 475 años. Entre los sismos más importantes que han ocurrido zona se encuentran los de 1938 (7.0 Mw, a 150 km de profundidad), 1962 (6.5 Mw, a 64 km de profundidad 64) y 1999 (6.1 Mw, a 15 km de profundidad). De esta manera, se observa que en este sector son relevantes sismos tanto de Benioff como corticales.

*Norte de Santander, Santander, Boyacá y Arauca*

En la Figura 86 se observa que a menos de 25 km de la frontera con Venezuela, en los departamentos de Norte de Santander y Arauca se estiman aceleraciones entre 0.4 y 0.6 g para un periodo de retorno de 475 años.

Entre los sismos más importantes que han ocurrido en esta zona se encuentran los sismos de 1644 de Pamplona (Magnitud 6.5 Mw; profundidad 15 km) y Cúcuta y Villa del Rosario, en 1875 (Magnitud 6.8 Mw; profundidad 15 km). Entre 25 y 50 km de la frontera con Venezuela se estiman aceleraciones entre 0.2 y 0.4g. Entre 50 y 200 km de tal frontera se estiman aceleraciones de hasta 0.2g.

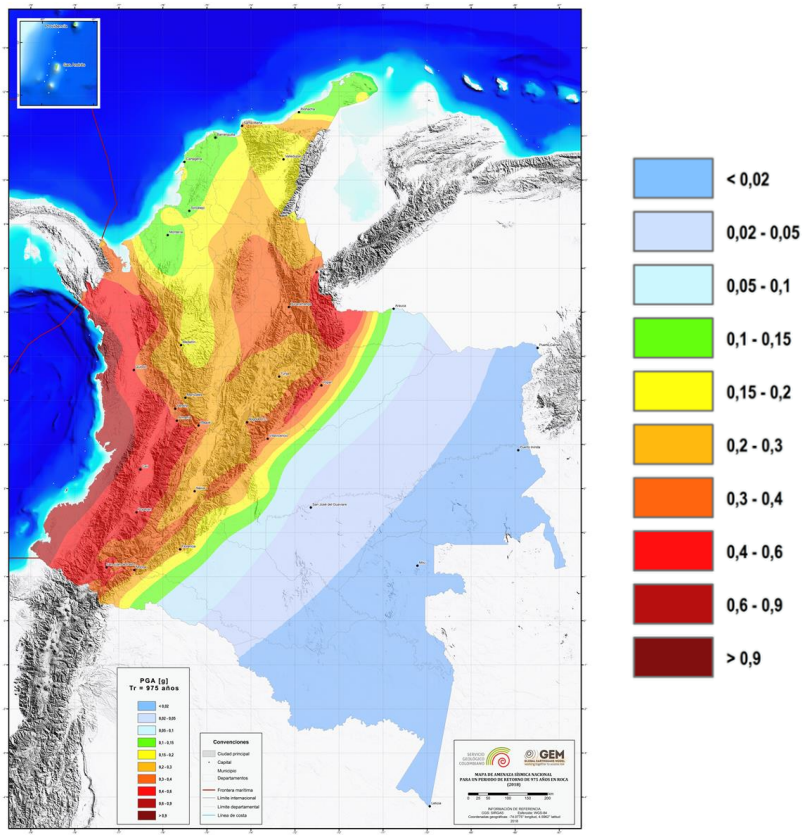



**Figura 87. Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 975 años**

Fuente: autores

*Borde llanero*

En la Figura 86, Figura 87 y Figura 88 se observa una franja sobre la cordillera oriental en las cual se calculan aceleraciones relativamente altas frente a las estimadas en el territorio nacional. En particular, para un periodo de retorno de 475 años, en la Figura 86 se observa que dichas aceleraciones varían entre 0.2 y 0.3 g.

Entre los sismos más importantes que han ocurrido en esta zona se encuentran los de Villavicencio en 1917 (6.7 Mw; profundidad 15 km), Tauramena en 1995 (6.4 Mw, profundidad 17 km), y Altamira en 1827 (7.1 Mw; profundidad 15 km). De esta manera, se considera que los sismos de fuentes superficiales (corticales), pueden tener una significativa contribución a la amenaza de esta zona.

*Costa atlántica, llanos orientales y Amazonía*

Comparativamente, zonas en la costa atlántica, al norte de los departamentos de Córdoba, Sucre, Bolívar, Atlántico, Magdalena y La Guajira tienen una menor amenaza. Para estas zonas se calculan aceleraciones menores a 0.1 g para un periodo de retorno de 475. Entre los eventos más relevantes que han ocurrido en esta zona se encuentra el sismo de Santa Marta de 1834 (Mw 6.4, profundidad 10 km).

Por otro lado, en la Figura 86, Figura 87 y Figura 88 se observa que, comparativamente, las zonas de menor amenaza se encuentran en las zona de llanos orientales, la Amazonía así como en parte de la Orinoquía, en los departamentos de Amazonas, Vaupés, Vichada, Guainía, Guaviare y Caquetá.

Para estas zonas se estiman aceleraciones menores a 0.05 g para un periodo de retorno de 475 años. En esta región ocurrieron sismos de magnitudes superiores a 7.5 Mw, cuyas profundidades fueron mayores a 600 km y que no generaron aceleraciones considerables.

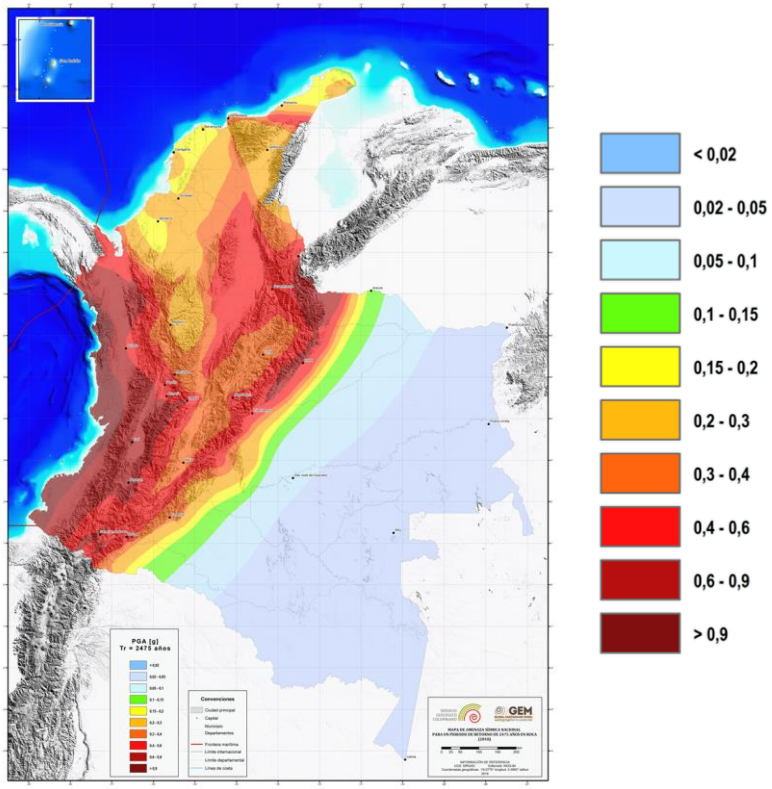



**Figura 88. Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 2475 años**

Fuente: autores

Al comparar los resultados entre los periodos de retorno de 475 años (Figura 86), 975 años (Figura 87) y 2475 años (Figura 88), se resalta que, a medida que se aumenta el periodo de retorno, la distribución geográfica de la amenaza se asemeja más a los trazos de las fallas activas consideradas en el modelo. Esta situación se puede observar sobre el trazo de la Falla de Oca, la Falla Santa Marta, la Falla de Algarrobo, la Falla Algeciras - Balsillas, y en las secciones de las fallas Guaicaramo y Yopal.

Estos resultados están relacionados con la definición de magnitudes máximas más altas en el modelo de las fallas activas y sismicidad distribuida, que las asignadas a las fuentes de sismicidad equiprobable (ver sección 4.3.2.3). De esta manera, a medida que se aumenta el periodo de retorno, se encuentra una mayor contribución a la amenaza por parte de las fallas activas.

Como referencia, la Tabla 35 presenta las aceleraciones pico estimadas para puntos ubicados en las capitales departamentales, considerando periodos de retorno de 225, 475, 975 y 2475 años.

**Tabla 35. Aceleración pico en roca estimada para capitales departamentales y para diferentes periodos de retorno**

| Departamento | Municipio | Long | Lat | 225 | 475 | 975 | 2475 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Antioquia | Medellín | -75.58 | 6.25 | 0.10 | 0.14 | 0.20 | 0.30 |
| Atlántico | Barranquilla | -74.81 | 10.98 | 0.05 | 0.08 | 0.12 | 0.18 |
| Bogotá | Bogotá, D.C. | -74.11 | 4.65 | 0.13 | 0.19 | 0.27 | 0.40 |
| Bolívar | Cartagena de Indias | -75.50 | 10.38 | 0.05 | 0.07 | 0.11 | 0.18 |
| Boyacá | Tunja | -73.36 | 5.54 | 0.13 | 0.18 | 0.24 | 0.33 |
| Caldas | Manizales | -75.49 | 5.06 | 0.14 | 0.21 | 0.28 | 0.40 |
| Caquetá | Florencia | -75.61 | 1.62 | 0.10 | 0.15 | 0.22 | 0.33 |
| Cauca | Popayán | -76.60 | 2.46 | 0.23 | 0.32 | 0.44 | 0.63 |
| Cesar | Valledupar | -73.26 | 10.46 | 0.07 | 0.11 | 0.16 | 0.24 |
| Córdoba | Montería | -75.87 | 8.76 | 0.06 | 0.09 | 0.13 | 0.20 |
| Chocó | San Francisco de Quibdó | -76.64 | 5.68 | 0.20 | 0.30 | 0.41 | 0.61 |
| Huila | Neiva | -75.28 | 2.94 | 0.12 | 0.17 | 0.23 | 0.32 |
| La Guajira | Riohacha | -72.91 | 11.53 | 0.06 | 0.10 | 0.14 | 0.23 |
| Magdalena | Santa Marta | -74.20 | 11.20 | 0.09 | 0.14 | 0.21 | 0.32 |
| Meta | Villavicencio | -73.62 | 4.12 | 0.14 | 0.23 | 0.35 | 0.57 |
| Nariño | San Juan de Pasto | -77.28 | 1.21 | 0.22 | 0.31 | 0.43 | 0.63 |
| Norte de Santander | Cúcuta | -72.51 | 7.91 | 0.21 | 0.30 | 0.41 | 0.60 |
| Quindío | Armenia | -75.68 | 4.54 | 0.20 | 0.29 | 0.40 | 0.57 |
| Risaralda | Pereira | -75.72 | 4.81 | 0.18 | 0.26 | 0.36 | 0.51 |
| Santander | Bucaramanga | -73.13 | 7.12 | 0.19 | 0.27 | 0.36 | 0.51 |
| Sucre | Sincelejo | -75.40 | 9.30 | 0.06 | 0.10 | 0.14 | 0.21 |
| Tolima | Ibagué | -75.20 | 4.43 | 0.17 | 0.25 | 0.38 | 0.61 |
| Valle del Cauca | Santiago de Cali | -76.52 | 3.41 | 0.27 | 0.38 | 0.50 | 0.69 |
| Arauca | Arauca | -70.75 | 7.07 | 0.05 | 0.07 | 0.10 | 0.14 |

| Departamento | Municipio | Long | Lat | 225 | 475 | 975 | 2475 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Casanare | Yopal | -72.40 | 5.33 | 0.16 | 0.25 | 0.38 | 0.61 |
| Putumayo | Mocoa | -76.65 | 1.15 | 0.16 | 0.23 | 0.33 | 0.49 |
| San Andrés y Providencia | San Andrés | -81.71 | 12.58 | 0.05 | 0.09 | 0.14 | 0.23 |
| Amazonas | Leticia | -69.94 | -4.20 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 |
| Guainía | Puerto Inírida | -67.92 | 3.87 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.04 |
| Guaviare | San José del Guaviare | -72.64 | 2.57 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.06 |
| Vaupés | Mitú | -70.23 | 1.25 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.04 |
| Vichada | Puerto Carreño | -67.49 | 6.19 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.03 |

Fuente: autores

### 7.1.1 Relaciones entre las aceleraciones pico obtenidas para diferentes periodos de retorno

La Figura 89 presenta el cociente entre las aceleraciones pico estimadas para periodos de retorno de (a) 975 años y (b) 2475 años respecto a las estimadas para un periodo de retorno de 475 años.

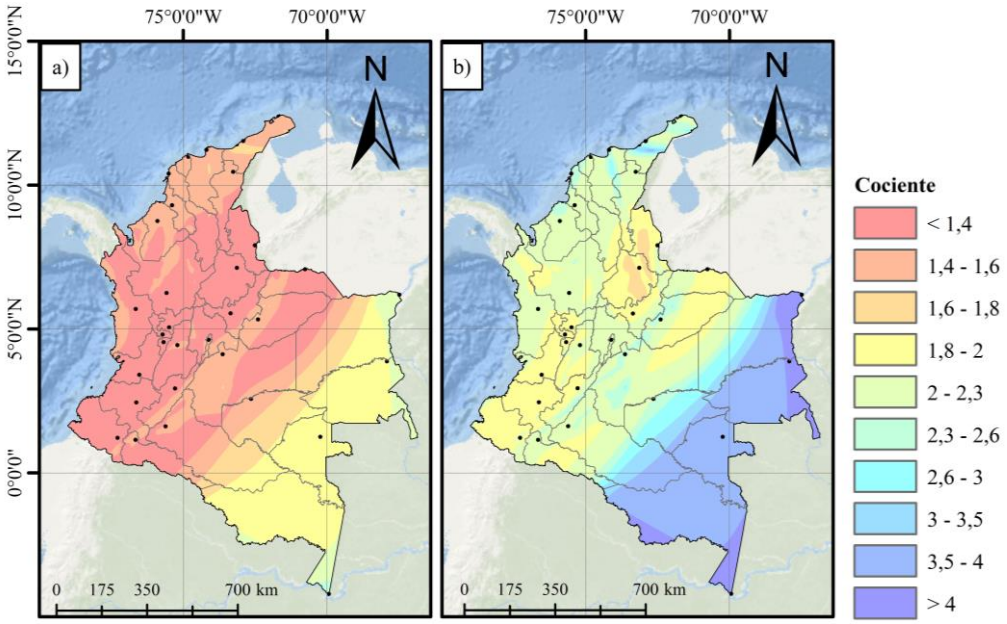



**Figura 89. Cociente entre aceleraciones pico para diferentes periodos de retorno (a) 975 / 475; (b) 2475 / 475**

Fuente: autores

En la Figura 89 se observa que tales razones varían en el territorio y que están relacionadas con la sismicidad. En las zonas de menor amenaza del país, (como la Amazonía), la razón entre las aceleraciones pico puede ser del orden de 2.0 veces (para 975 años) y del orden de 4 veces (para 2475 años). Por su parte, en las zonas de mayor amenaza (como el departamento de Nariño), tales relaciones pueden ser del orden entre 1.4 veces (para 975 años) y 2.0 veces (para 2475 años).

### 7.1.2 Ambientes tectónicos predominantes en la evaluación de la amenaza sísmica

Con el fin de tener una mayor comprensión sobre los resultados, se realizaron estimaciones de la amenaza sísmica para cada ambiente tectónico considerando los árboles lógicos de ecuaciones de atenuación correspondientes. Los valores medios obtenidos se compararon entre sí con el fin de identificar los ambientes tectónicos que producen las aceleraciones más altas en el territorio. La Figura 90 presenta la distribución geográfica de los ambientes tectónicos que generan los mayores valores de aceleración pico (PGA) para un periodo de retorno de 475 años.

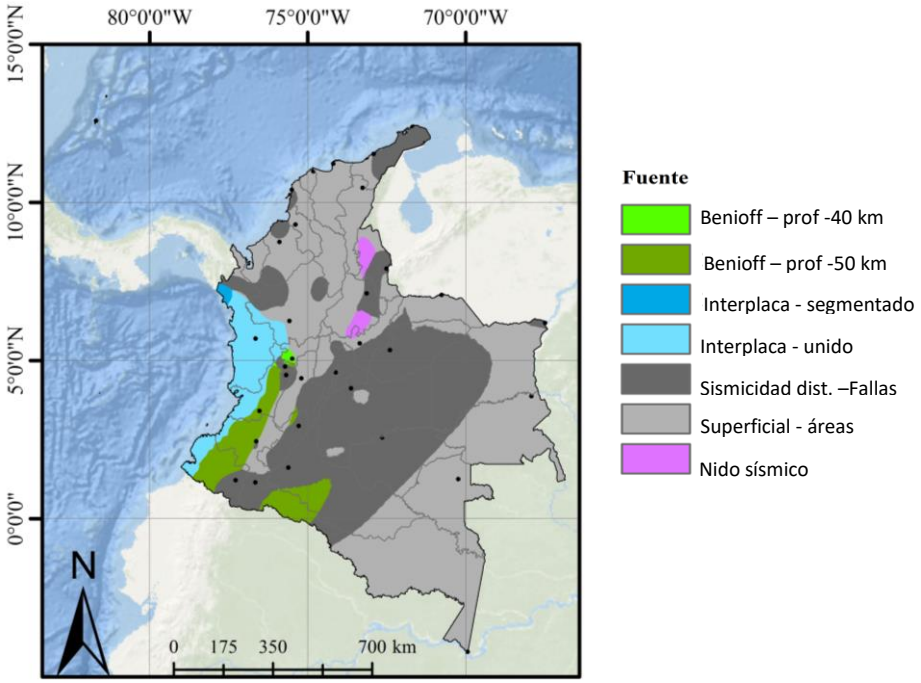



**Figura 90. Ambiente tectónico de mayor aceleración pico (Tr 475 años)**

Fuente: autores

A partir de la Figura 90 se presentan las siguientes observaciones:

- Las fuentes interplaca (del modelo unido y segmentado) producen las aceleraciones pico más altas para la zona pacífico. Hacia el norte, esta zona tiene una extensión cercana a 200 km desde la costa pacífica, abarcando el departamento de Chocó. Hacia el sur, en los departamentos de Nariño y Cauca, esta zona se extiende a menos de 50 km de la costa pacífica.
- Las fuentes tipo Benioff son relevantes para los departamentos de Nariño, Cauca y Valle, llegando incluso hasta Quindío, en una zona contigua a la de sismos interplaca. También se observan zonas de mayores aceleraciones de esta fuente hacia la zona central del departamento de Putumayo.

- El nido sísmico de Bucaramanga contribuye en mayor medida a la amenaza sísmica del noroccidente del departamento de Norte de Santander y hacia el sur del departamento de Santander.
- Al norte de La Guajira y sobre las cordilleras central y oriental se observa que las mayores aceleraciones corresponden a fuentes de los modelos de sismicidad distribuida y de fallas activas
- El modelo de fuentes superficiales de sismicidad equiprobable produce las mayores aceleraciones en la costa atlántica, en los llanos orientales y parte de la Orinoquía, en el eje cafetero y gran parte de los departamentos de Antioquia y Tolima.

Como complemento al anterior análisis, la Figura 91 presenta los ambientes de segunda mayor aceleración pico. A partir de esta Figura se presentan las siguientes observaciones:

- El modelo de sismicidad equiprobable se complementa con el modelo de sismicidad distribuida y fallas activas.
- Las fuentes interplaca del modelo segmentado generan menores aceleraciones que las del modelo unido.
- Las fuentes de tipo Benioff, interplaca y superficiales son relevantes para los municipios del eje cafetero.
- Las fuentes de tipo Benioff son relevantes para los departamentos de Cauca, Valle, y Tolima.

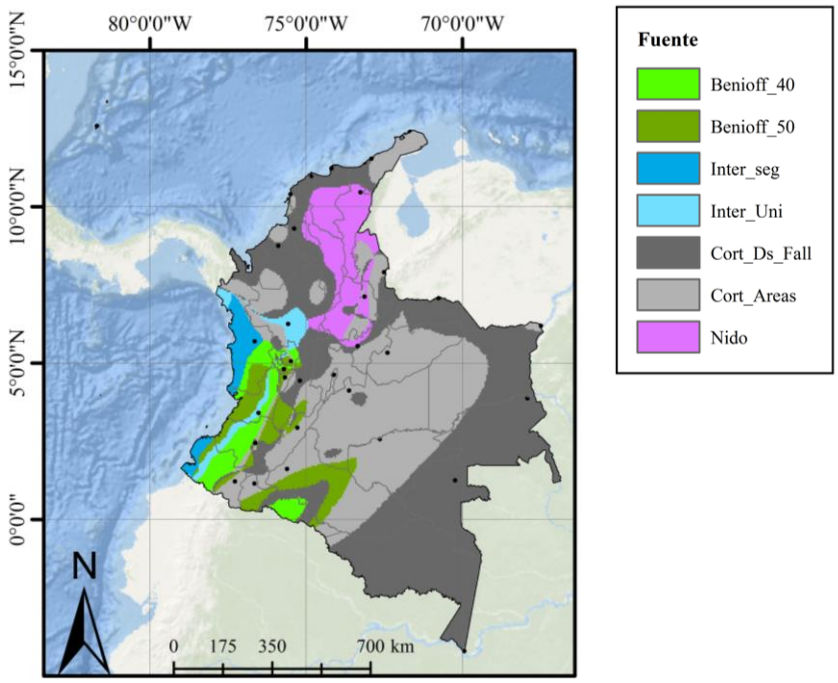



**Figura 91. Ambiente tectónico de segunda mayor aceleración pico (Tr 475 años)**

Fuente: autores

## 7.2 Curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme

La evaluación de la amenaza sísmica se ha realizado para una malla de puntos regular, así como para las localizaciones de centros poblados del país. Para cada punto se encuentran curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme para periodos de retorno de 475 y 2475 años. La Figura 92 presenta ejemplos de estos resultados para un punto dentro del municipio de Pasto. En el Anexo I se presentan los espectros de amenaza uniforme obtenidos para las principales capitales del país.

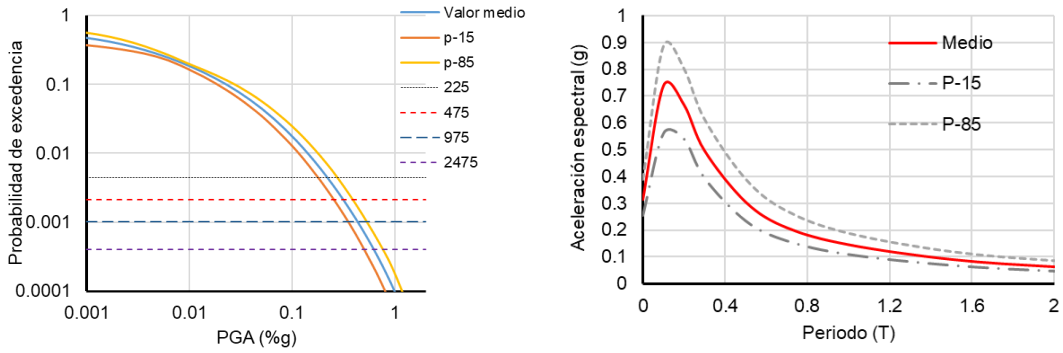



**Figura 92. (a) curva de amenaza; (b) espectro de amenaza uniforme (Tr 475 años) para un punto dentro del municipio de Pasto**

Fuente: autores

Estos resultados, sumados a mapas de amenaza para periodos de retorno de 31, 225,475,975 y 2475 años se encuentran disponibles en el sitio de consulta del modelo de amenaza (SGC 2018). Detalles del sistema de consulta se encuentran en el Anexo J.

## 7.3 Desagregación de la amenaza sísmica

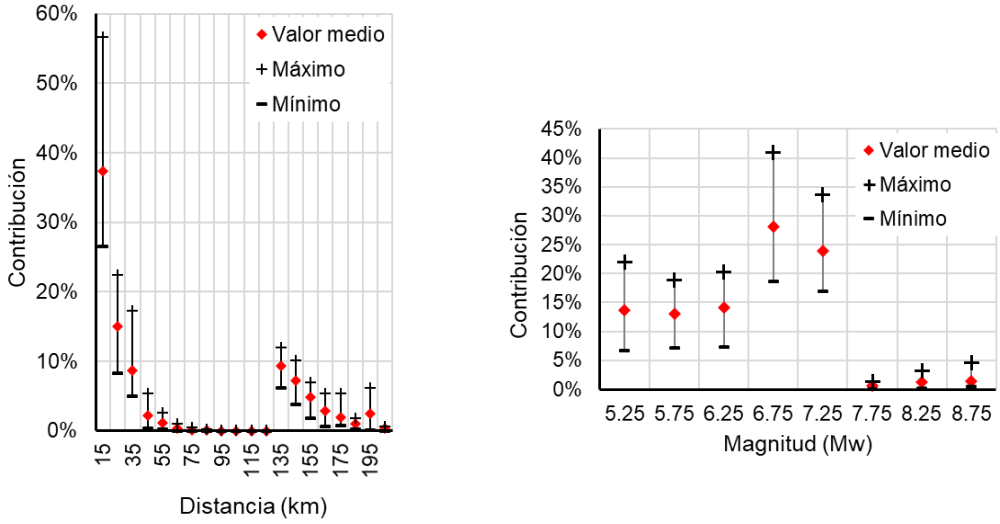
A partir del modelo elaborado es posible realizar análisis de desagregación de la amenaza, el cual es útil para identificar, para un sitio determinado, el tipo de sismos de mayor contribución a la amenaza sísmica.

Bajo la metodología descrita en Pagani et ál. (2014), el análisis de desagregación se realiza para un determinado periodo de retorno, para el cual se estiman las probabilidades de excedencia de un rango de valores de intensidad del movimiento, considerando diferentes propiedades de los sismos, tales como su magnitud, distancia al sitio de análisis, ambiente tectónico y localización geográfica de las rupturas que pueden generarse.

A continuación, se describen ejemplos del tipo de resultados del análisis de desagregación. La Figura 93 presenta resultados para el municipio de Pasto (Colombia) en cuanto a la contribución a la amenaza según distancia y magnitud de las rupturas. Considerando que para el cálculo de la amenaza se obtiene un conjunto de realizaciones según el árbol lógico de ecuaciones de atenuación y de fuentes

sísmicas, es posible calcular un rango de valores, así como el valor esperado de la contribución según distancia y magnitudes de las rupturas.

La Figura 94 presenta resultados del análisis de desagregación según ambiente tectónico y periodo de vibración para periodos de retorno de 475 y 975 años. Por último, la Figura 95 presenta la distribución geográfica de la contribución de las rupturas a la amenaza sísmica de Popayán según ambientes tectónicos: (a) corticales; (b) interplaca; (c) zona Benioff, considerando aceleraciones pico (PGA) para un periodo de retorno de 475 años.

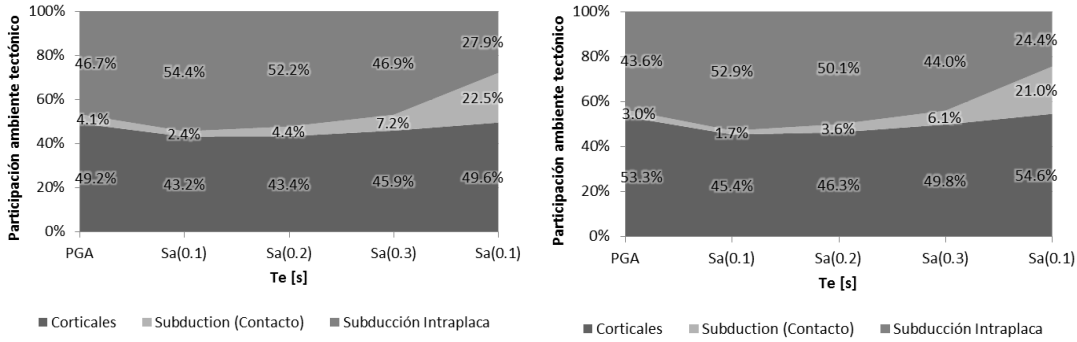



(a) Desagregación según distancia

(b) Desagregación según magnitud

**Figura 93. Desagregación de la amenaza sísmica para Pasto según (a) distancia; (b) magnitud de las rupturas (TR 475- PGA)**

Fuente: Autores




(a) Tr= 475

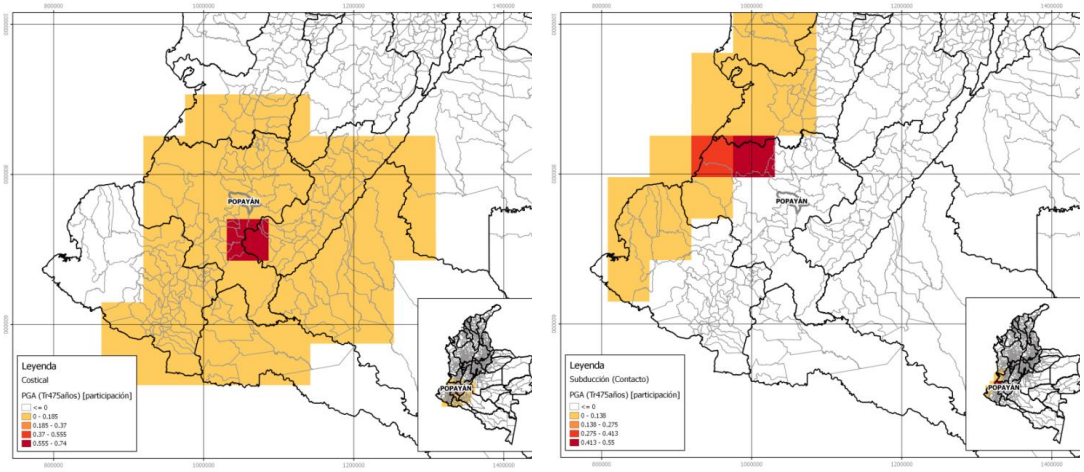
(b) Tr =975

**Figura 94. Resultados de la desagregación de la amenaza sísmica para Popayán según ambientes tectónicos y periodos de vibración para (a) Tr =475 años; (b) 975 años**

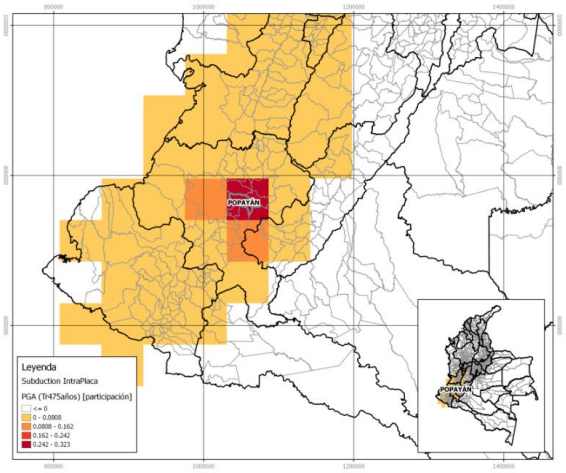
Fuente: autores

Los resultados del análisis según distancias, magnitudes y ambientes tectónicos se consideran relevantes para la selección de registros acelerográficos que sean de interés tanto para el análisis del comportamiento estructural, así como para el análisis de respuesta dinámica de suelos.

A su vez, estos resultados son útiles para la definición del tipo de sismos y de escenarios de daño para la formulación de planes de respuesta por terremoto.




**(a) Corticales** **(b) Subducción - Interplaca (contacto)**




(c) **Zona Benioff**

**Figura 95. Distribución geográfica de la contribución de las rupturas a la amenaza sísmica de Popayán según ambientes tectónicos: (a) corticales; (b) interplaca; (c) zona Benioff. Periodo de retorno 475 años**

Fuente: autores

# 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En Colombia se han realizado estimaciones de amenaza sísmica por parte diferentes instituciones. Entre los resultados más relevantes, se resaltan los modelos utilizados para la definición de los coeficientes sísmicos que se han adoptado en las normas y reglamentos sismo resistentes (García et ál., 1984; AIS-Uniandes-Ingeominas 1996; AIS 2009). En estos modelos se han realizado esfuerzos respecto a la construcción de un catálogo de eventos, la descripción de fuentes sísmicas y la selección de ecuaciones de atenuación.

Partiendo de estos avances, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en conjunto con la Fundación Global Earthquake Model (GEM), elaboró un modelo con el fin de contribuir al conocimiento de la amenaza sísmica nacional. De esta colaboración se destacan las siguientes actividades:

*Conjunto de datos básicos:*

- Elaboración de un catálogo sísmico a partir de la compilación y procesamiento de diferentes catálogos globales y nacionales.

*Modelo de fuentes sísmicas:*

- Consideración de información y criterios geológicos, tectónicos y sismológicos en la definición de la geometría de fuentes sísmicas.
- Elaboración de modelos de sismicidad distribuida y de sismicidad equiprobable para el análisis de fuentes corticales.
- Caracterización de fallas activas para la modelación de fuentes sísmicas superficiales desde un punto de vista tectónico.

*Ecuaciones de atenuación:*

- Evaluación y selección de ecuaciones de atenuación que mejor representen las intensidades del movimiento observadas según los diferentes ambientes tectónicos.

Resultados:

- Divulgación del modelo y de los resultados de la amenaza sísmica mediante sistemas de consulta abiertos al público.

En este capítulo se presentan principales productos y conclusiones del modelo elaborado por la colaboración SGC-GEM.

## 8.1 Conjunto de datos básicos

*Catálogo Sísmico Integrado*

Se elaboró un Catálogo Sísmico Integrado (CSI) a partir de la recopilación de información de múltiples fuentes, la depuración de eventos repetidos y la homogenización de sus magnitudes.

Para la elaboración del CSI se consultó información de los siguientes catálogos globales y nacionales:

- EHB (Engdahl et ál., 1998)
- ISC-GEM, (Di Giacomo et ál., 2014; Storchak et ál., 2013),
- CENTENNIAL, (Engdahl & Villaseñor, 2002)
- International Seismological Centre – ISC – (Bondar & Storchak, 2011)
- Global Centroid Moment Tensor Catalog - GCMT, (Storchak et ál., 2013)
- ANNS Composite (ANSS)
- (NCEDC, 2013)
- ANSS Comprehensive (NEIC), (USGS, 2014);
- Centro Internacional de Datos – IDC (ISC, 2015).
- Servicio Geológico Colombiano -SGC (Colombia)
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica -IGEPN (Ecuador) (Beauval et ál., 2013)
- Centro Sismológico de América Central – CASC – (Alvarenga et ál., 1998)
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales – INETER (INETER, 2016)
- Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas -FUNVISIS (Venezuela).

*Depuración de eventos repetidos*: se establecieron criterios de priorización de la información contenida en los catálogos consultados, con el fin de identificar la información preferida de cada uno, en el caso que un sismo se encuentre reportado en dos o más catálogos.

*Homogenización de magnitudes:* La magnitud de los eventos del CSI se encuentra expresada en términos de la magnitud momento (Mw). Para este fin, se estimaron relaciones usando valores de Mw estimados a partir de M0 (reportado por el GCMT por medio del tensor de momento). A su vez, se consideraron los valores de mb y Ms estimados por el NEIC y presentados por el GCMT para los mismos eventos que cuentan con magnitud Mw.

Como resultado de este proceso, el CSI cuenta con un total de 34,681 eventos, ocurridos a partir de 1610, cuyas magnitudes varían entre 2.9 y 8.8 Mw. Teniendo en cuenta que para el desarrollo del CSI se utilizaron eventos de bases de datos globales y nacionales, el CSI contiene información de una adecuada cobertura geográfica y temporal.

El catálogo de eventos es una herramienta relevante para definir los parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas identificadas. Considerando que en el presente estudio se supone que los eventos son independientes, se realizó una remoción de eventos dependientes utilizando el algoritmo de Gardner y Knopoff (1974). A su vez, se llevó un análisis de periodos de completitud de magnitudes utilizando la metodología de Stepp (1972).

*Base de datos de movimiento fuerte*

Se consolidaron 1786 registros (tri-axiales) para 118 sismos, los cuales fueron procesados para corregir la línea base. A su vez se recopiló información de los eventos en términos de su ubicación, magnitud y mecanismo focal (de acuerdo con las soluciones estables del catálogo GCMT).

Los eventos se clasificaron en los siguientes ambientes tectónicos: corteza activa (cortical), interplaca (subducción en la costa pacífica), intraplaca (zona de Benioff y nido sísmico de Bucaramanga). La Tabla 36 presenta una descripción general de los eventos de la base de datos de movimiento fuerte.

**Tabla 36 Descripción general de los eventos de la base de datos de movimiento fuerte**

| Ambiente Tectónico | Mecanismos focales predominantes | # Registros | Profundidad Promedio, [km] | Rango Mw |
|---|---|---|---|---|
| Cortical | Strike - Slip | 607 | 25 | 4.8 - 7 |
| Nido | Compuesto | 485 | 147 | 4.8 – 6.25 |
| Benioff | | 435 | 131 | 4.8 – 7.3 |
| Interplaca | Inverso | 259 | 22 | 5 – 7.8 |

Fuente: autores

Además de la compilación y procesamiento de los registros acelerográficos, se realizó una base de datos de caracterización de efectos de sitio de las estaciones, considerando los siguientes parámetros: profundidades para las cuáles se encuentran velocidades de onda cortante (Vs) de 1.0 y 2.5 km/s ($Z_{1.0}$ y $Z_{2.5}$, respectivamente), así como el promedio de la velocidad de onda de corte para los 30 metros más superficiales del suelo ($Vs_{30}$).

Tal caracterización es fundamental, ya que permite considerar posibles efectos de sitio en la comparación entre las aceleraciones espectrales calculadas mediante ecuaciones de atenuación y las observadas en los registros acelerográficos. De esta manera, la caracterización de las estaciones contribuye a que la amenaza sísmica se calcule en roca firme, depurando posibles efectos de sitio (teniendo en cuenta las limitaciones de los parámetros $Vs_{30}$, $Z_{1.0}$ y $Z_{2.5}$). Esta diferenciación según efectos de sitio tiene mayor incidencia en la estimación de aceleraciones espectrales para periodos intermedios y altos (mayores a 0.75s).

*Base de datos de fallas activas*

Se revisó una base de datos de fallas activas a partir de experiencias previas regionales y nacionales. En total se compiló información para 171 estructuras, para las cuales se determinó información respecto a sus características geométricas y geodinámicas, con las cuales es posible obtener parámetros relevantes para la evaluación de la amenaza sísmica.

Las características geométricas se definieron a partir del ángulo de buzamiento promedio, la dirección del buzamiento, la dirección del bloque hundido de la falla y la geometría de la falla en formato WKT (Well-Known Text).

Por su parte, las características geodinámicas se definieron a partir del tipo de movimiento cinemático predominante, la tasa de deslizamiento anual (total), la tasa de deslizamiento anual (en la dirección del rumbo), la tasa de deslizamiento anual (vertical), la tasa de deslizamiento anual (horizontal) y el ángulo de deslizamiento de la falla (rake).

De esta manera, la base de datos de fallas activas representa un avance en la estandarización y aprovechamiento de la información geológica para el cálculo de la amenaza sísmica.

## 8.2 Modelo de fuentes sísmicas

La sismicidad de Colombia se clasificó en los siguientes ambientes tectónicos: (i) sismos superficiales (corticales), de profundidad menor a 30 km, distribuidos a lo largo del territorio nacional; (ii) sismos interplaca, localizados en la costa pacífica, en el contacto entre las placas Nazca y Suramérica, (iii) sismos intraplaca (Benioff), los cuales ocurren al interior de la placa de Nazca, en el volumen que subduce a la placa Suramérica; y (iv) el nido sísmico de Bucaramanga.

Para cada ambiente se definió un conjunto de fuentes sísmicas, las cuales se describieron en términos de su geometría y de su actividad. Para la modelación de las fuentes se consideraron las siguientes alternativas:

- Para fuentes corticales: un modelo de fuentes tipo área (de sismicidad equiprobable) y un modelo compuesto de sismicidad distribuida y de fallas activas.
- Para fuentes interplaca (subducción) e intraplaca (zona Benioff), se consideraron variaciones en la profundidad y en la geometría de la fuente.

*Geometría de las fuentes*

La geometría de las fuentes corticales tipo área se definió a partir de un procedimiento que comprende un análisis de la estructura de la corteza terrestre, información geológica de la superficie e información de sismicidad histórica e instrumental. Este procedimiento facilita la justificación y documentación tanto de los datos como de los criterios geológicos, tectónicos y sismológicos utilizados en la definición de los límites geográficos de fuentes corticales.

Para el modelo de sismicidad distribuida se delinearon nueve macro zonas, las cuales corresponden a la agrupación de fuentes tipo área de ambientes sismotectónicos similares. Por su parte, a partir de la base de datos de fallas activas, se definieron las trazas y demás propiedades geométricas de las fallas.

Para la definición de la geometría de las fuentes de subducción (interplaca) y de Benioff, se elaboraron secciones transversales a lo largo de la trinchera del pacífico. Sobre estas secciones se identificó la localización y la profundidad de los sismos ocurridos. A partir de esta información se infirió tanto la extensión como la variación en profundidad de la placa subducente. Un procedimiento similar se llevó a cabo para definir la geometría del nido sísmico de Bucaramanga.

Bajo el anterior procedimiento es posible tener una evaluación más realista de la amenaza sísmica de fuentes de subducción e intraplaca, al tener en cuenta las variaciones en la profundidad de los sismos acordes a la interacción de las placas tectónicas.

Considerando que existe incertidumbre en la definición de la profundidad en la cual terminan los sismos interplaca y comienzan los de la zona de Benioff, se establecieron dos alternativas geométricas de tales fuentes, variando dicha profundidad entre 40 y 50 km.

Adicionalmente, para la modelación de fuentes de subducción se consideraron dos casos: uno en la cual la fuente corresponde a un único volumen en la costa pacífica, así como un modelo segmentado, en el cual la subducción se divide en tres volúmenes, cada uno descrito por diferentes parámetros de sismicidad. Esta última aproximación permite un mayor detalle en la distribución geográfica y de magnitudes de los sismos que se pueden generar en la zona de subducción.

*Parámetros de sismicidad*

La actividad de las fuentes sísmicas (a excepción de las fallas activas), se determinó mediante distribuciones de recurrencia de magnitudes, las cuales se obtuvieron utilizando el CSI depurado (sin réplicas).

Para las fallas activas, su actividad sísmica se determinó a partir de información geológica, considerando relaciones entre la productividad de la falla (número de terremotos promedio entre la magnitud mínima y máxima) y la tasa de liberación de momento total, representado por la tasa de deslizamiento anual.

Bajo este enfoque, en la estimación de la actividad de fuentes superficiales es posible tener en cuenta el potencial de ocurrencia de sismos de magnitudes considerables (por ejemplo, superiores a 6.5 Mw) que, a pesar de no estar registrados en catálogos de eventos históricos, han sido identificados a través del reconocimiento geológico de las fallas activas. De esta manera, el análisis de amenaza se enriquece con los datos geológicos.

*Árbol lógico de fuentes sísmicas*

El modelo de fuentes sísmicas se resume en un árbol lógico (ver Tabla 37 ). Dicho árbol contiene las diferentes alternativas para la modelación de las fuentes, así como sus pesos correspondientes. Tales pesos representan el grado de creencia que los autores tienen sobre cada alternativa.

**Tabla 37. Resumen del árbol lógico de fuentes sísmicas**

| Tipo de fuente /Modelo | Modelo (b1) Peso: 40% | Modelo (b2) Peso: 60% |
|---|---|---|
| Fuentes corticales | - Fuentes tipo falla (fallas activas).<br>-Modelo de sismicidad suavizada | -Fuentes tipo área. Modelo de sismicidad equiprobale |
| Fuentes interplaca del proceso de subducción del pacífico | -Profundidad de fuentes: 50 km; modelo no segmentado | - Profundidad de fuentes: 40 km; modelo segmentado |
| Zona de Benioff (proceso de subducción del pacífico) | Profundidad de fuentes: 50 km | Profundidad de fuentes: 40 km |
| Nido sísmico de Bucaramanga | Igual para los dos modelos | |

Fuente: autores

## 8.3 Ecuaciones de atenuación

Las ecuaciones de atenuación son un componente importante para la modelación de la amenaza sísmica, ya que permiten estimar los valores de las intensidades del movimiento que se esperan en el territorio ante la ocurrencia de sismos. Por lo tanto, es relevante utilizar ecuaciones con las cuales se obtenga un buen ajuste respecto a las intensidades del movimiento observadas en sismos ocurridos en el país.

Para este fin, para cada ambiente tectónico se llevó a cabo una preselección de ecuaciones disponibles en la literatura. Sobre esta preselección se llevaron a cabo procedimientos de evaluación para identificar (de manera cuantitativa), el ajuste entre las ecuaciones de atenuación con las aceleraciones espectrales registradas en la base de datos de movimiento fuerte.

Los procedimientos de evaluación adoptados fueron los siguientes: análisis de residuales (Stafford et ál., 2008), modelo de verosimilitud - LH (Scherbaum et ál., 2004), modelo del logaritmo de verosimilitud normalizado - LLH (Scherbaum et ál., 2009) y ranking basado en la Distancia Euclidiana (Kale y Akkar 2013).

A partir de los métodos de evaluación mencionados se identificaron las tres ecuaciones de mejor ajuste. Utilizando el método LLH se determinaron los pesos correspondientes de cada una (ver Tabla 38). Por simplicidad, se utilizó un peso promedio para todas las ordenadas espectrales.

**Tabla 38. Resumen del árbol lógico de ecuaciones de atenuación**

| Fuentes corticales (superficiales) | | Subducción - Interplaca | |
|---|---|---|---|
| **Ecuación de atenuación** | **Peso** | **Ecuación de atenuación** | **Peso** |
| Idriss2014 (Idriss, 2014) | 0.399 | AbrahamsonEtAl2015SInter (Abrahamson et ál., 2016) | 0.437 |
| CauzziEtAl2014 (Cauzzi et ál., 2014) | 0.389 | ZhaoEtAl2006SInterNSHMP2008 (Zhao et ál., 2006) | 0.348 |
| AbrahamsonEtAl2014 (Abrahamson et ál., 2014) | 0.211 | MontalvaEtAl2016SInter (Montalva et ál., 2017) modificada | 0.215 |
| **Nido de Bucaramanga (Intraplaca)** | | **Benioff (Intraplaca)** | |
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 (Zhao et ál., 2006) | 0.443 | MontalvaEtAl2016SSlab (Montalva et ál., 2017) modificada | 0.424 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab Abrahamson et ál. (2016) | 0.285 | AbrahamsonEtAl2015SSlab (Abrahamson et ál., 2016) | 0.365 |
| MontalvaEtAl2016SSlab Montalva et ál., 2017) modificada | 0.272 | ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 (Zhao et ál., 2006) | 0.21 |

Fuente: autores

Dado que el proceso de selección de ecuaciones de atenuación se llevó a cabo utilizando metodologías reconocidas en publicaciones científicas y que se utilizó la base de datos de movimiento fuerte elaborada para este estudio, se considera que el resultado es objetivo, verificable y reproducible, garantizando así transparencia en el análisis. De esta manera, las ecuaciones seleccionadas responden a los datos disponibles y a los procedimientos adoptados. A su vez, se resalta el uso de ecuaciones del estado del conocimiento ("de nueva generación") en las cuales se incorporan efectos de sitio.

## 8.4 Resultados

Bajo una metodología probabilista se obtuvieron curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme (para diferentes percentiles), así como mapas de amenaza sísmica para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años. Tales resultados se generaron para una malla de puntos que cubren el territorio nacional. Los resultados del análisis se encuentran disponibles en SGC (2018).

En términos generales, en los mapas de amenaza obtenidos se observan mayores aceleraciones espectrales en el pacífico colombiano, en el eje cafetero, el borde llanero, así como en los departamentos de Arauca, Norte de Santander y Santander. Tales zonas corresponden a los sectores en los que se tienen registros históricos de eventos destructivos, tales como el de Tumaco de 1906 (magnitud 8.8 Mw), el del Eje Cafetero en 1999 (Magnitud 6.1 Mw) y el de Cúcuta y Villa del Rosario, en 1875 (Magnitud 6.8 Mw).

Las zonas en las que se estiman las menores aceleraciones espectrales se encuentran en la Amazonía, así como en parte de la Orinoquía, en los departamentos de Amazonas, Vaupés, Vichada, Guainía, Guaviare y Caquetá. En estas regiones no se tienen registros de eventos que hayan afectado a la población o a la infraestructura.

Los resultados del modelo de amenaza sísmica están determinados por la geometría, localización y parámetros de actividad de las fuentes sísmicas. Dado que tales parámetros dependen del catálogo depurado de sismos, los mapas de amenaza son consistentes con la distribución geográfica de la sismicidad. Esta conclusión, a pesar de que pueda resultar obvia, resalta la importancia del trabajo realizado en la construcción del CSI y en la caracterización de las fuentes sísmicas.

## 8.5 Recomendaciones

A partir de la colaboración SGC–GEM se desarrolló un modelo y se realizaron cálculos de la amenaza sísmica en el territorio nacional. Dado el alcance geográfico y las limitaciones de conocimiento, se recomienda que el modelo y los resultados se utilicen como valores de referencia (a nivel de factibilidad), para actividades relacionadas con la gestión del riesgo sísmico a escala nacional y regional. No se recomienda hacer uso de esta información para el diseño de proyectos de infraestructura específica; los resultados del presente estudio no corresponden a coeficientes sísmicos de diseño aplicables para cualquier edificio o infraestructura.

Considerando las limitaciones del conocimiento, así como las metodologías y supuestos adoptados el análisis de la amenaza sísmica, se reconoce que pueden existir diferentes casos de análisis y modelos de amenaza, los cuales pueden llevar a diferentes resultados. El presente estudio ofrece una alternativa de modelación soportada en bases de datos de diferente naturaleza, los cuales fueron procesados con herramientas y metodologías novedosas. Así, cada usuario está en potestad de elegir tanto el modelo como los resultados de amenaza que a su juicio sean de mayor pertinencia para los fines para los cuales los requiera.

El modelo y los resultados se encuentran disponible en el sitio de consulta difundido por el SGC (SGC 2018), de tal manera que cualquier actor interesado puede utilizarlos. Para su uso, el personal técnico del SGC está disponible para atender inquietudes, así como para recibir sugerencias y recomendaciones que sirvan para complementar, actualizar y mejorar los resultados.

Sobre los insumos y procedimientos para la modelación de la amenaza sísmica, se resalta la importancia del trabajo realizado por la colaboración SGC-GEM en el desarrollo de bases de datos de diferente índole que sirvieron de soporte para la modelación. En este sentido, se recomienda continuar promoviendo desde un enfoque multidisciplinario, crítico y de datos abiertos, la compilación, depuración, procesamiento y análisis de datos de catálogos sísmicos, fallas activas, registros acelerográficos, información geológica, tectónica, entre otras fuentes de información, a partir de las cuales se tomen decisiones en la modelación de la amenaza sísmica.

En este sentido, el SGC invita a que los centros de investigación, académicos y expertos en la modelación de la amenaza sísmica contribuyan, desde diferentes disciplinas, en el conocimiento de la amenaza nacional. De esta manera se busca que, en un ambiente técnico de colaboración y coordinación, el país cuente con el mejor conocimiento posible de la amenaza, teniendo en cuenta que el fin último de esta información es la seguridad de la población, de las construcciones y de la infraestructura.

# 9. REFERENCIAS

Abrahamson, N., y Silva, W. (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*, 24(1), 67-97. DOI:10.1193/1.2924360

Abrahamson, N., Silva, W. J., y Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025-1055. DOI: 10.1193/070913EQS198M.

Abrahamson, N., Gregor, N., y Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23-44. DOI:10.1193/051712EQS188MR.

AIS-Uniandes-Ingeominas (1996). Estudio General de Amenaza sísmica de Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. Comité AIS-300, Bogotá, 252 pp.

AIS (2009), Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (2009). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. Comité AIS-300, Bogotá, 227 pp

Aki, K. y Richards, P. G. (1980). Quantitative seismology. Freeman, San Francisco, Vol. I and II, 932 pp

Akkar, S., y Bommer, J. (2006). Influence of long-period filter cut-off on elastic spectral displacements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (35), 1145-1165. DOI:10.1002/eqe.577.

Akkar, S., y Cagnan, Z. (2010). A Local Ground Motion Predictive Model for Turkey, and Its Comparison with Other Regional and Global Ground Motion Models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 10(6), 2978-2995. DOI: 10.1785/0120090367.

Akkar, S., Sandikkaya, M., y Bommer, J. (2014). Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 359-387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4.

Al Atik, L., y Youngs, R. R. (2014). Epistemic Uncertainty for NGA-West2 Models. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1301-1318.

Albini, P., Musson, R., Gomez Capera, A., Locati, M., Rovida, A., Stucchi, M. y Vigano, D. (2013). Global Historical Earthquake Archive and Catalogue (1000-1903). GEM Technical Report 2013-01 V1.0.0, 200pp. (G. Foundation, Ed.) Pavía, Italia. DOI: 10.13117/GEM.GEGD.TR2013.01

Alvarenga, E., Barquero, R., Boschini, I., Escobar, J., y Fernández, M. (1998). Central American Seismic Center (CASC). *Seismological Research Letters*, 69(5), 394-399.

Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S., y Donahue, J. L. (2013). “PEER NGA-West2 Database”. USA.

Anderson JG, Luco JE. (1983), Consequences of slip rate constraints on earthquake recurrence relations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, 471–496.

Ansari, A., Firuzi, E., y Etemadsaeed, L. (2015) Delineation of Seismic Sources in Probabilistic Seismic-Hazard Analysis Using Fuzzy Cluster Analysis and Monte Carlo Simulation. *Bulletin of the Seismological Society of America,* 105(4), 2174-2191.

Arcila M., y Dimaté, C. (2005). *Caracterización de fuentes sísmicas*. Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Informe No. 1-6. Bogotá.: INGEOMINAS DAGMA. M.

Arcila, M., García-Mayordomo, J., y López, M.C (2017, septiembre) *Modelo de zonas sismogénicas para la evaluación de la amenaza sísmica de Colombia*. Ponencia presentada en el XVI Congreso Colombiano de Geología. Santa Marta, Colombia, 1540-1543

Audemard, F.; Machette, M.; Cox, J.; Dart, R., y Haller, K. (2000). Map and database of Quaternay faults in Venezuela and its offshore regions. *USGS Open File Report* 00-018: p. 78.

Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, y Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2a), 773-786.

Benito, M.B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquín, G., Molina, E., W. Rojas, W., Escobar, J.J., Talavera, E., Alvarado, G.E., y Torres, Y. (2012). A New Evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 504–523. DOI: 10.1785/0120110015.

Bernal, G. (2014), *Metodología para la modelación, cálculo y calibración de parámetros de la amenaza sísmica para la evaluación probabilista del riesgo*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R., y Augliera, P. (2014). Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 391-430. DOI :10.1007/s10518-013-9525-5.

Bondar, I., y Storchak, D. (2011). Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophysical Journal International*, 186, 1220-1244.

Boore, D. M., y Atkinson, G. M. (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138. DOI: 10.1193/1.2830434.

Boore, D. M. (2010). Orientation-Independent, Nongeometric-Mean Measures of Seismic Intensity from Two Horizontal Components of Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1830-1835. DOI: 10.1785/0120090400.

Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., y Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057-1085. DOI: 10.1193/070113EQS184M.

Bormann, P., Liu, R., Xu, Z., Zhang, L., y Wendt, S. (2009). First application of the new IASPEI teleseismic magnitude standards to data of the China National Seismographic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1869 - 1891.

Budnitz, R.J., Apostalakis, G., Boore, D.M., Cluff, L.S., Coppersmith, K.J., Cornell C.A., y Morris, P.A. (1997). Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts. Senior Seismic Hazard'Analysis Committee (SSHAC). U.S. Nuclear Regulatory Commission U.S. Department of Energy Electric Power Research Institute. NUREG/CR-6372 UCRL-ID- 122160 Vol. 1.

Campbell K.W. (1997). Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seismological Research Letters*, 68(1997), 154-79.

Campbell, y Borzognia. (2007). NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. PEER Report No. 2007/02, 238. Berkeley, California, USA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California.

Campbell, K. W., y Borzognia, Y. (2014). NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087-1115. DOI: 10.1193/062913EQS175M.

Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M., y Bianchini, A. (2014). Updated predictive equations for broadband (0.01-10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bulletin of Earthquake Engineering*. DOI:10.1007/s10518-014-9685-y.

CEPAL (1999). El terremoto de enero de 1999 en Colombia: Impacto socioeconómico del desastre en la zona del Eje Cafetero. Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL- Sede Subregional en México. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – Colombia.

Chen, Y.-S., Weatherill, G., Pagani, M., y Cotton, F. (2018). A transparent and data-driven global tectonic regionalization model for seismic hazard assessment. *Geophysical Journal International*, 213(2), 1263–1280. DOI:10.1093/gji/ggy005

Chiarabba, C., P. De Gori, C. Faccenna, F. Speranza, D. Seccia, V. Dionicio, y G. A. Prieto (2015), Subduction system and flat slab beneath the Eastern Cordillera of Colombia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16. DOI: 10.1002/ 2015GC006048.

Chiou, B.S-J., y Youngs, R. (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 24(1), 173-215.

Chiou, B.S-J., y Youngs, R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1117-1153.

Condori-Quispe, C., y Pérez, J.L (2015). Análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en el valle del Cauca, suroccidente de Colombia. *GEOS*, 35(2), 1-16.

Cornell, A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America,* 58(5), 1583-1606.

Costa, C., Audemard, F., Bezerra, H., Lavenu, A., Machette, M., y Paris, G. (2006). An overview of the main Quaternary deformation of South America. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61(4), 461–479.

Cotton, F., Scherbaum, F., Bommer, J. J., y Bungum, H. (2006). Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: Application to Central Europe and rock sites. *Journal of Seismology*, 10, 137-156. DOI:10.1007/s10950-005-9006-7.

CSN (s/f). Sismicidad y terremotos en Chile. Centro Sismológico Nacional. Universidad de Chile. Recuperado de: http://www.csn.uchile.cl/wp-content/uploads/2014/06/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf

Di Giacomo, D., Bondár, I., Storchak, D., Engdahl, R., Bormann, P., y Harris, J. (2014.). ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009), III. Re-computed Ms and mb, proxy Mw, final composition and completeness assessment. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* (239), 33-47.

Dobry, R., Borchedt, R. D., Crouse, C. B., Idriss, I. M., Joyner, W. B., Martin, G. R., y Seed, R. B. (2000). New site coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions. *Earthquake Spectra*, 16(1).

Donovan, N.C (1973). Earthquake Hazards for Buildings in building practices for disaster Mitigation, *National Bureau of Standards*, 46, 82-111.

Douglas, J. (2018). Ground motion prediction equations 1965-2018. Glasgow, United Kingdom: University of Strathclyde.

Dziewonski, A. M., T.-A. Chou y Woodhouse J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *Journal of Geophysical Research*, 86, 2825-2852, DOI: 10.1029/JB086iB04p02825.

Egüez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M., Costa, C., y Dart, R. (2003). Database and Map of Quaternary Faults and Folds in Ecuador and its Offshore Region. United States Geological Survey Open-File Report 03- (289), 77

Ekström, G., M. Nettles, y A. M. Dziewonski (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200-201, 1-9. DOI:10.1016/j.pepi.2012.04.002

Engdahl, E., Van der Hilst, R., y Buland, R. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(3), 722-743.

Engdahl, E., y Villaseñor, A. (2002). Global Seismicity: 1900 – 1999. En W. Lee, H. Kanamori, P. Jenning, y C. Kisslinger, International handbook of Earthquake and Engineering Seismology, A(41), 665 - 690.

Estrada-Uribe, G., y Ramírez, J. (1977). Mapa de riesgo sísmico. Instituto Geofísico. Universidad Javeriana. Bogotá.

Faccioli, E., y Cauzzi, C. (2008). Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *Journal of Seismology*, 12, 453-475. DOI: 10.1007/s10950-008-9098-y.

Faccioli, E., Bianchini, A., y Villani, M. (2010). New ground motion prediction equations for T>1 s and their influence on seismic hazard assessment. *Proceedings of the University of Tokyo Symposium on Long-Period Ground Motion and Urban Disaster Mitigation*. Tokyo, Japan.

Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L. y Seal, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, 45(2), DOI: 10.1029/2005RG000183.

Field, E. H., T. H. Jordan, y C. A. Cornell (2003). OpenSHA - A developing Community Modeling Environment for Seismic Hazard Analysis. *Seismological Research Letters*, 74, 406-419.

Frankel, A. (1995). Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters*, 66(4), 8-21.

Gallego, M. (2000). *Estimación del Riesgo Sísmico en la República de Colombia*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

García, D., Singh, S.K., Herraiz, M., Ordaz, M., y Pacheco, J.F (2005). Inslab earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2272-2282.

García, D., Wald, D.J., y Hearne, M.G. (2012). A Global Earthquake Discrimination Scheme to Optimize Ground-Motion Prediction Equation Selection. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1), 185-203. DOI: 10.1785/0120110124.

García, J., Weatherill, G., Pagani, M., Rodriguez, L., Poggi, V., y SARA Hazard Working Group (2017, enero). *Building an open seismic hazard model for South America: The SARA-PSHA model*. Ponencia presentada en el *16th World Conference on Earthquake, 16WCEE* 2017, Santiago, Chile.

García, L.E., Sarria, A., Espinosa, S.A., Bernal, C.E., y Puccini, M., (1984). Estudio general del riesgo sísmico de Colombia. *Boletín Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*, (28).

García-Mayordomo, J. (2015). Creación de un modelo de zonas sismogénicas para el cálculo del mapa de peligrosidad sísmica de España. Instituto Geológico y Minero de España.

Gardner, J. K. and L. Knopoff (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363–1367.

GCMT (2017). Global CMT Web Page. Recuperado de http://www.globalcmt.org/

GEM (2018). The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.2.0. DOI: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.2.0.

GEM (s/f) Global Earthquake Model Repositories. oq – engine. Recuperado de:

https://github.com/gem/oq-engine/tree/master/openquake/hazardlib/gsim

Getsinger, J.S., y Hickson, C.J. (2000). Multinational Andean Project (MAP): Geological co-operation across borders. *Geoscience Canada* 27(3).

Ghofrani, H., y Atkinson, G. M. (2014). Ground-motion prediction equations for interface earthquakes of M7 to M9 based on empirical data from Japan. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 549-571. DOI:10.1007/s10518-013-9533-5.

Gutenberg, B., y Richter, C, F. (1954). Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton University Press, Princeton.

Hainzl, S., F. Scherbaum., y C. Beauval (2006). Estimating Background Activity Based on Interevent-Time Distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(1), 313–320, DOI: 10.1785/0120050053.

Hayes, G. P., Wald, D. J., y Johnson, R. L. (2012). Slab1.0 A three-dimensional model of global subduction zone geometries". J*ournal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B1):n/a–n/a, 2012. ISSN 2156-2202.

Hayes, G.P., Moore, G.L., Portner, D.E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., y Smoczyk, G.M (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, 362(6410), 58-61. DOI: 10.1126/science.aat4723

Heuret, A., S. Lallemand, F. Funiciello, C. Piromallo, y C. Faccenna (2011). Physical characteristics of subduction interface type seismogenic zones revisited. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(1), 1–26, DOI: 10.1029/ 2010GC003230.

Heuret, A., Losq, J., y Lallemand, S. (2015). SubMAP (Subduction database). Recuperado de http://submap.gm.univ-montp2.fr/

Hutton, K., Woessner, J., y Hauksson, E. (2010). Earthquake monitoring in southern California for seventy-seven years (1932-2008). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(2), 423-446. DOI: 10.1785/0120090130

Idriss, I. (2014). An NGA-West2 Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1155-1177. DOI: 10.1193/072813EQS219M.

IGEPN (s/f). Descarga de Datos. Recuperado de: https://www.igepn.edu.ec/solicitud-de-datos/formulario-descarga-de-datos.

IGEPN. (2016). Observaciones del sismo del 16 de abril de 2016 de magnitud Mw 7.8. Intensidades y aceleraciones. Quito, Ecuador.

IGEPN. (2018). Reporte de las réplicas del 18 de mayo de 2016. Aceleraciones. Quito, Ecuador.

INETER. (2016). Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Recuperado de http://www.ineter.gob.ni/

Ingeominas – Universidad Nacional (2010). Mapa nacional de amenaza sísmica. Periodo de retorno 475 años. Recuperado de: https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=BusquedaPredefinida=DGAMapNacAmenSismic1500K

ISC (s/fa). ISC-GEM Catalogue/Download and Legal. Recuperado de: http://www.isc.ac.uk/iscgem/download.php.

ISC (s/f b). Reviewed ISC Bulletin. Recuperado de http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/review/.

ISC (s/fc). Bulletin of the International Seismological Centre. Recuperado de http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/.

ISC (2012). International Seismological Centre, EHB Bulletin. Recuperado el 04 de diciembre de 2015, de http://www.isc.ac.uk/ehbbulletin/

ISC (2015). International Seismological Centre (ISC), Annual 2015 Director's Report. Report, International Seismological Centre.

Kaklamanos, J., Baise, L. G., y Boore, D. M. (2011). Estimating Unknown Input Parameters when Implementing the NGA Ground-Motion Prediction Equations in Engineering Practice". *Eartquake Spectra*, 27(4), 1219 - 1235.

Kale, O and S. Akkar (2013). A New Procedure for Selecting and Ranking Ground-Motion Prediction Equations (GMPES): The Euclidean Distance-Based Ranking (EDR) Method. *Bulletin of the Seismological Society of America* 103(2A), 1069-1084. DOI: 10.1785/0120120134.

Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., y Fukushima, Y. (2006). A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 879-897. DOI: 10.1785/0120050138.

Kaverina, A., Lander, A., y Prozorov, A. (1996). Global creepex distribution and its relation to earthquake-source geometry and tectonic origin. *Geophysical Journal International*, 125, 249-265.

Lay, T., H. Kanamori, C. J. Ammon, K. D. Koper, A. R. Hutko, L. Ye, H. Yue, y T. M. Rushing (2012), Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults. *Journal of Geophysical Research*, 117 (B04311). DOI: 10.1029/2011JB009133.

Laske, G., Masters, G., Ma, Z., y Pasyanos, M. (2013). Update on CRUST1.0 - A 1-degree global model of Earth's crust. *Geophysical Research Abstracts*, 15, Abstract EGU2013–2658.

Leonard, M. (2010). Earthquake fault scaling: Relating rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 1971–1988.

Leonard, M. (2014). Self-Consistent Earthquake Fault-Scaling Relations: Update and Extension to Stable Continental Strike-Slip Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(6), 2953-2965. DOI: 10.1785/0120140087.

Lin, P.-S., y Lee, C.-T. (2008). Ground-Motion Attenuation Relationships for Subduction-Zone Earthquakes in Northeastern Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(1), 220-240. DOI:10.1785/0120060002.

MAVDT (2010), Ley 400 de 1997 (Modificada por la ley 1229 de 2008 y el Decreto 019 de 2012), Decreto 926 del 19 de marzo de 2010 por medio del cual se adopta el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, Bogotá, Colombia.

McGuire, R.K (1974). Seismic Structural Response Risk Analysis, Incorporating Peak Response Regressions on earthquake magnitude and distance, MIT, Department of Civil Engineering, Research Report R74-51.

McGuire, R. K. (2004). Seismic Hazard and Risk Analysis", Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA

Mintransporte (2015). Resolución No. 108 de 2015 por medio de la cual se adopta la Norma colombiana de diseño de puentes CCP-14. Ministerio de Transporte, Bogotá, Colombia.

Monelli, D., Pagani, M., Weatherill, G., Danciu, y L., García, J. (2014).Modeling Distributed Seismicity for Probabilistic Seismic-Hazard Analysis: Implementation and Insights with the OpenQuake Engine. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(4), 1636-1649. DOI: 10.1785/0120130309

Monsalve, M.L., Correa-Tamayo, A.M., Arcila, M., y Dixon, J. (2009). Firma Adakítika en los productos recientes de los volcanes Nevado del Huila y Puracé, Colombia." *Boletín Geológico* 43. Servicio Geológico Colombiano.

Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodríguez Marek, A. (2017). Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), 901-911. DOI: 10.1785/0120160221.

Montes, N.E., y Sandoval, A. (2001). Base de datos de fallas activas de Colombia. Proyecto compilación y levantamiento de la información geodinámica (Proyecto RG502), Glosario: 9–26.

Musson, R. M. W. (1999). Probabilistic Seismic Hazard Maps for the North Balkan Region. *Annali di Geofisica* 42(2), 1109–1124.

NCEDC (2013). Northern California Earthquake Data Center. Recuperado de http://quake.geo.berkeley.edu/anss/anss-detail.html#doc

Ojeda A., Martínez, S. A. (1997). *Modelo para la atenuación de la energía sísmica en Colombia a partir de los sismos registrados por la red nacional de acelerógrafos*. XII Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia.

Ordaz, M. (2009). Segundo informe sobre los modelos INGEOMINAS y AIS de amenaza sísmica de Colombia". Presentación en formato .ppt.

Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, y M., Vigano, D. (2014 a). "OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismological Research Letters*. 85(3), 692–702. DOI:10.1785/0220130087.

Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G. A. y Garcia, J. (2014 b). The OpenQuake-engine Book: Hazard. Global Earthquake Model (GEM) Technical Report 2014-08, DOI: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.TR2014.08,67pages.

Pagani, M., Garcia, J., Monelli, D., Weatherill, G., y Smolka, A. (2015). A summary of hazard datasets and guidelines supported by the Global Earthquake Model during

the first implementation phase. *Annals of Geophysics*, 58(1) S0108; DOI: 10.4401/ag-6677.

Pagani, M., García, J., Poggi, V., y Weatherill, G. (2016, agosto). *Probabilistic seismic hazard analysis: issues and challenges from the gem perspective.* Ponencia presentada en el 5th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Taipei, China.

Paris, G., Machette, M., Dart, R., y Haller, K. (2000) Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its offshore Regions. United States. Geological Survey Open-File Report, 00-(284): p. 66.

Pasyanos, M. E., Masters, T. G., Laske, G., y Ma, Z. (2014). LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 2153–2173. DOI: 10.1002/2013jb010626

PEER. (2013). GEM-PEER Task 3 Project: Selection of a Global Set of Ground Motion Prediction Equations.

Pedraza-Garcia, P., Vargas, C.A., y Monsalve, H. (2007).Geometric model of the Nazca plate subduction in southwest Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 11(2), 117-130.

Pennington, W.D. (1983). Role of shallow phase changes in the subduction of oceanic crust. *Science*, 220(4601), 1045-1047. DOI: 10.1126/ science.220.4601.1045

Petersen, M., Harmsen, S., Haller, K., Mueller, C., Luco, N., Hayes, G., y Rukstales, K. (2010). Preliminary Seismic Hazard Model for South America. *In Proceedings of Conferencia Internacional. Homenaje a Alberto Giesecke Matto*.

Poveda, E., Julia, J., Schimmel, M., y Pérez García, N. (2018). Upper and Middle Crustal Velocity Structure of the Colombian Andes from Ambient Noise Tomography: Investigating Subduction-Related Magmatism in the Overriding Plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. DOI: 10.1002/2017JB014688.

Prieto, G.A., Beroza, G.C., Barrett, S.A., López, G.A., y Flórez, M. (2012). Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics. *Tectonophysics*, 570-571, 42-56.

Proyecto Multinacional Andino (2008). Geociencia para las Comunidades Andinas Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 7, 320 p., 1 mapa en CD-ROM.

Ramírez, J.E., y Forero-Durán, L.F (1957). Mapa Sísmico y Tectónico de Colombia. Instituto Geofísico de Los Andes Colombianos.

Reasenberg, P. (1985). Second-order moment of central California seismicity, 1969-82, *Journal of Geophysical Research*, 90, 5479 - 5495.

Reiter, L. (1991). Earthquake Hazard Analysis. Columbia University Press. ISBN 10: 0231065345 ISBN 13: 9780231065344

Salgado, M.A., Bernal, G.A., Yamín, L.E., y Cardona, O.D. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Revista de ingeniería*. 28-37

Salgado-Gálvez, M.A., Bernal, G.A., y Cardona, O.D (2016). Evaluación probabilista de la amenaza sísmica de Colombia con fines de actualización de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14" *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 32(4), 230-239.

Sarria, A. (1995). Ingeniería Sísmica". Segunda Edición. Ediciones Uniandes. Bogotá, Colombia.

Scherbaum, F., Cotton, F., y Smit, P. (2004). On the Use of Response Spectral-Reference Data for the Selection and Ranking of Ground-Motion Models for Seismic-Hazard Analysis in Regions of Moderate Seismicity: The Case of Rock Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6), 2164-2185. DOI: 10.1785/0120030147.

Scherbaum, F., Delavaud, E., y Riggelsen, C. (2009). Model Selection in Seismic Hazard Analysis: An Information-Theoretic Perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6), 3234-3247. DOI: 10.1785/0120080347.

Schneider, J.F., Pennington, W.D., y Meyer, R.P. (1987). Microseismicity and focal mechanisms of the intermediate-depth Bucaramanga Nest, Colombia. *Journal of Geophysical Research*, 92(B13), 13913-13926

Scordillis, E. (2006). Empirical Global relations converting Ms and mb to moment magnitude. *Journal of Seismology*, 10, 225-236.

Sepúlveda-Jaimes, F.J., y Cabrera-Zambrano, F.H. (2018). Tomografía sísmica 3D del nido sísmico de Bucaramanga (Colombia)". *Boletín de Geología*, 40(2), 15-33. DOI: 10.18273/revbol.v40n2-2018001

SGC (2015). Mapa de intensidades máximas observadas para Colombia. Servicio Geológico Colombiano.

SGC (2018). Consulta de la amenaza sísmica de Colombia" Recuperado de: https://amenazasismica.sgc.gov.co/

SGC (s/f). Sismicidad Histórica de Colombia. Recuperado de: http://sish.sgc.gov.co/visor/

SGC(s/f). Consulta Catálogo Sísmico. Recuperado de: https://www2.sgc.gov.co/sgc/sismos/Paginas/catalogo-sismico.aspx

Singh, S.K., Reinoso, E., Arroyo, D., Ordaz, M., Cruz-Atienza, V., Pérez-Campos, yX., Iglesias, A., y V. Hjörleifsdóttir, V. (2018). Deadly Intraslab Mexico Earthquake of 19 September 2017 (Mw 7.1): Ground Motion and Damage Pattern in Mexico City. *Seismological Research Letters,* 89 (6), 2193- 2203

Stafford, P. J., Strasser, F. O., y Bommer, J. J. (2008). An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 149-177. DOI: 10.1007/s10518-007-9053-2.

Stepp, J. (1972). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard". *Proceedings of the International Conference on Microzonation*, 2, 897-910.

Storchak, D., Di Giacomo, I., Bondár, I., Engdahl, R., Harris, J., Lee, W., y Bormann, P. (2013). "Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009)". *Seismological Research Letters*, 84(5), 810-815.

Strasser, F., Arango, M., y Bommer, J. (2010). Scaling of the Source Dimensions of Interface and Intraslab Subduction-zone Earthquakes with Moment Magnitude. *Seismological Research Letters*, 81(6). DOI:10.1785/gssrl.81.6.941

Taboada, A., Dimaté, C., y Fuenzalida, A. (1998). Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. *Física de la Tierra*, 10, 111-147

Taboada, A. Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., y Olaya, J. (2000). Geodynamics of Northern Andes: Subduction and Intra-Continental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), 787-813

Thingbaijam, K.K.S., Mai, P. (2016). Evidence for Truncated Exponential Probability Distribution of Earthquake Slip" *Bulletin of the Seismological Society of America* 106(4) , 1802-1816, DOI: 10.1785/0120150291.¿

Thompson, E. M., y Wald, D. J. (2012, septiembre). *Developing Vs30 Site-Condition Maps Combining Observations with Geologic and Topographic Constraints*. Ponencia presentada en el 15 World Conference on Earthquake Engineering – WCEE -, Lisboa, Portugal.

Thompson, E. M., Wald, D. J., y Worden, C. B. (2014). "A Vs30 map for California with Geologic and Topographic Constrains". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), 2313-2321. DOI: 10.1785/0120130312

Trifonov, V.G. y Machette, N.M. (1993). The world map of major active faults project. *Annali di Geofísica*, 36(3-4), 225-236.

Uhrhammer, R. (1986). Characteristics of Northern and Central California Seismicity, *Earthquake Notes*, 57(1), 21

USGS (s/f). Centennial Earthquake Catalog. Recuperado de: https://earthquake.usgs.gov/data/centennial/

USGS (s/f b) Search Earthquake Catalog .Recuperado de https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/

USGS. (2014). USGS, About ANSS Comprehensive Catalog and Important Caveats. Recuperado de: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/doc_aboutdata.php#reference

Van der Meijde, M., Julià, J., y Assumpção, M. (2013). Gravity derived Moho for South America. *Tectonophysics*, 609, 456–467. DOI:10.1016/j.tecto.2013.03.023.

Van der Hilst, R., y Mann, P. (1994). Tectonic implication of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. *Geology*, 22, 451-454.

Van Stiphout, T., J. Zhuang, y D. Marsan (2012). Theme V -Models and Techniques for Analysing Seismicity. Technical report. Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis. Recuperado de http://www.corssa.org.

Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., y Kanamori, H. (1999). Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Modified Mercalli Intensity in California. *Earthquake Spectra*, 15 (3) 557 – 564.

Wald, D. J., y Allen, T. I. (2009). On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions (VS30). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2A), 935-943. DOI: 10.1785/0120080255.

Wald, D. J., McWhirter, L., Thompson, E., y Hering, A. S. (2011). A new strategy for developing Vs30 maps. *4 IASPEI – IAEE International Symposium*.

Weatherall, P., K. M. Marks, M. Jakobsson, T. Schmitt, S. Tani, J. E. Arndt, M. Rovere, D. Chayes, V. Ferrini, y R. Wigley (2015). A new digital bathymetric model of the world's oceans", *Earth and Space Science*, 2, 331–345.DOI:10.1002/2015EA000107.

Weatherill, G. (2014). OpenQuake Hazard Modeller's Toolkit - User Guide. Technical Report, GEM Foundation.

Weichert, D.H (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4), 1337-1346.

Woessner, J., y Wiemer, S. (2005). Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), 684–698.

Woo, G (1996). Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Source Modeling, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(2), 353-362.

Youngs, R. R., y Abrahamson, N. A. (1992). A stable algorithm for regression analyses using the random effects model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(1), 505-510.

Youngs, R., Chiou, S., Silva, W., y Humphrey, J. (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58-73. DOI:10.1785/gssrl.68.1.58.

Youngs, R. R. y K. J. Coppersmith (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 939-964

Zarifi, Z., Havskov, J., y Hanyga, A. (2007). An insight into the Bucaramanga nest. *Tectonophysic*s, 443(1-2), 93-105. DOI: 10.1016/j. tecto.2007.06.004.

Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Toshimasa, T., y Fukushima, Y. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913. DOI: 10.1785/0120050122

Zhao, J. X., S. L. Zhou, P. J. Gao, T. Long, Y. B. Zhang, H. K. Thio, M. Lu, y D. A. Rhoades (2015). An earthquake classification scheme adapted for Japan determined by the goodness-of-fit for ground-motion prediction equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(5) 2750–2763.

Zhao, J. X., Zhou, S., Zhou, J., Zhao, C., Zhang, H., Zhang, Y., Irikura, K. (2016a). Ground-Motion Prediction Equations for Shallow Crustal and Upper-Mantle Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 106(4), 1552-1569. DOI: 10.1785/0120150063

Zhao, J. X., Liang, X., Jiang, F., Xing, H., Zhu, M., Hou, E., y Somerville, P. G. (2016 b). Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Interface Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), 1518-1534. DOI: 10.1785/0120150034.

Zhao, J., Jiang, F., Shi, P., Xing, H., Huang, H., y Hou, R. (2016 c). Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Slab Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), 1535-1551. DOI: 10.1785/0120150056

Zhuang, J., Y. Ogata, and D. Vere-Jones (2002). Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences. *Journal of the American Statistical Association*, 97 (458), 369–380.

# ANEXOS

**A Base de datos de movimiento fuerte:**

En este anexo se presentan principales características de los eventos sísmicos que componen la base de datos de movimiento fuerte, en términos de su localización, profundidad, mecanismo focal y tipo de falla.

**B Procesamiento de señales de aceleración:**

En este anexo se describe la metodología aplicada para procesar los registros acelerográficos de la base de datos de movimiento fuerte. Esta metodología se fundamenta en la propuesta por Ancheta et ál. (2013) y corresponde a un proceso iterativo en donde el registro se somete a una corrección de línea base y a un proceso de filtrado en el dominio de la frecuencia.

**C Distribuciones de magnitud-frecuencia para fuentes corticales tipo área:**

En este anexo se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia obtenidas para las fuentes corticales tipo área

**D Distribuciones de magnitud-frecuencia para macro zonas del modelo de sismicidad suavizado**

En este anexo se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia obtenida para las macro-zonas establecidas en el modelo de sismicidad distribuida.

**E Distribuciones de magnitud-frecuencia para fallas activas:**

En este anexo se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia obtenidas para las fallas activas.

**F Distribuciones de magnitud-frecuencia para fuentes interplaca (subducción), Benioff y nido sísmico de Bucaramanga:**

En este anexo se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia obtenidas para las fuentes interplaca, de la zona Benioff y del nido sísmico de Bucaramanga.

**G Propiedades geométricas utilizadas para el uso de ecuaciones de atenuación:**

En este anexo se presentan las propiedades geométricas requeridas para el cálculo de intensidades sísmicas usando las ecuaciones de atenuación consideradas en este estudio.
Estas propiedades se presentan según ambientes tectónicos para cada uno de los registros de la base de datos de movimiento fuerte. Estas propiedades están definidas para la localización de cada estación con respecto a cada

evento registrado. Asimismo, en este anexo se presentan los valores de PGA obtenidos para cada registro procesado.

**H Resultados de la selección de ecuaciones de atenuación según ambiente tectónico:**

En este anexo se presentan los valores del parámetro LLH obtenido para las ecuaciones de atenuación pre seleccionadas. Este parámetro permite evaluar el ajuste de tales ecuaciones con las aceleraciones de los eventos de la base de base de datos de movimiento fuerte.
A su vez se presentan, para las ecuaciones de mejor ajuste, los resultados obtenidos para otros parámetros de evaluación y diferentes periodos de vibración.

**I Espectros de amenaza uniforme y curvas de amenaza para capitales departamentales:**

En este anexo se presentan (para las capitales departamentales), los espectros de amenaza uniforme obtenidos para diferentes periodos de retorno y percentiles. A su vez, se presentan valores medios de las curvas de amenaza para diferentes periodos de vibración.

**J Descripción del sistema de consulta del modelo y de los resultados de la amenaza sísmica:**

En este Anexo se presentan una descripción breve del sistema de consulta, indicando su estructura principal y los resultados disponibles al público.

# Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

# Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia

**Servicio Geológico Colombiano ©**
**Fundación Global Earthquake Model ©**

**ISBN impreso:** 978-958-52794-5-2
**ISBN digital:** 978-958-52794-6-9
**DOI:** https://doi.org/10.32685/9789585279469
**Colección: Publicaciones Geológicas Especiales vol. 43**

Oscar Paredes Zapata
**Director general**

Marta Lucía Calvache Velasco
**Directora técnica de Geoamenazas**

María Mónica Arcila Rivera
**Gerente del proyecto Amenaza y riesgo sísmico en Colombia**

**Autores**
María Mónica Arcila Rivera - Servicio Geológico Colombiano
Julio García - Fundación Global Earthquake Model
Julián Santiago Montejo Espitia - Servicio Geológico Colombiano
Jaime Fernando Eraso - Servicio Geológico Colombiano
Jairo Andrés Valcárcel Torres - Servicio Geológico Colombiano
Miguel Genaro Mora Cuevas - Servicio Geológico Colombiano
Daniele Viganò - Fundación Global Earthquake Model
Marco Pagani - Fundación Global Earthquake Model
Fernando Javier Díaz Parra - Servicio Geológico Colombiano

**Comité Editorial**
**Presidente**
Virgilio Amaris Ibáñez

**Integrantes**
Mario Andrés Cuéllar
Gloria Prieto Rincón
Marta Calvache Velasco
Hernán Olaya Dávila
Humberto Andrés Fuenzalida
Hernando Camargo
Margarita Bravo Guerrero
Viviana Dionicio
Teresa Duque
Julián Escallón
Armando Espinosa
Juan Guillermo Ramírez
Manuel Hernando Romero

Diagonal 53 n.° 34-53
Bogotá D. C., Colombia
Teléfono: 220 0200, ext.: 3048
ceditorial@sgc.gov.co

**Corrección de estilo**
Edgar Ordóñez

**Diseño y diagramación**
Diana Paola Abadía

**Editora general**
Carolina Hernández

Julio, 2020

Citación:
Arcila, M. García, J., Montejo, J., Eraso, J., Valcarcel, J., Mora, M., Viganò, D., Pagani, M. y Díaz, F. (2020). *Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model. https://doi.org/10.32685/9789585279469

# Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

El futuro es de todos

Minenergía

# CONTENIDO


**Presentación** 13
**Agradecimientos y reconocimientos** 15

1 **Introducción** 17
**1.1 Principales sismos ocurridos en el país** 18
**1.2 Estudios previos de amenaza sísmica** 22
**1.3 Estructura de la publicación y del modelo de amenaza sísmica** 28

2 **Objetivos y alcance** 31
**2.1 Objetivos** 31
**2.2 Alcances y limitaciones** 32

3 **Conjunto de datos básicos** 35
**3.1 Catálogo Sísmico Integrado** 36
3.1.1 Catálogos sísmicos utilizados 36
3.1.2 Priorización e integración de los catálogos seleccionados 37
3.1.3 Homogeneización de magnitudes 41
3.1.4 Características del CSI 43
3.1.5 Remoción de eventos dependientes del Catálogo Sísmico Integrado 44
3.1.6 Análisis de completitud 45
**3.2 Base de datos de fallas activas** 47
**3.3. Base de datos de movimientos fuertes** 50
3.3.1 Información por región tectónica 50
3.3.2 Base de datos de estaciones 52
3.3.3 Procesamiento de acelerogramas 55

4 **Modelo de fuentes sísmicas** 57
**4.1 Clasificación tectónica de la sismicidad** 60
4.1.1 Ambiente cortical 61
4.1.2 Zona de subducción del Pacífico (interplaca) 62
4.1.3 Zona de Benioff 63
4.1.4 Sismicidad intraplaca del nido sísmico de Bucaramanga 64
4.1.5 Criterios para la clasificación de sismos según ambientes tectónicos 64
**4.2. Árbol lógico de fuentes sísmicas adoptado para Colombia** 67
**4.3 Modelación de fuentes sísmicas** 68
4.3.1 Fuentes superficiales tipo área (volumétricas) 68
4.3.2 Modelo de sismicidad suavizada y de fuentes tipo falla 74
4.3.3 Modelación de fuentes de subducción y profundas 83

5 Selección de ecuaciones de atenuación 95
**5.1 Preselección de ecuaciones de atenuación 96**
**5.2 Evaluación de ecuaciones de atenuación 99**
5.2.1 Definición de árboles lógicos de ecuaciones de atenuación 99

6 Cálculo de la amenaza sísmica 109
**6.1 Metodología para estimar la amenaza sísmica 110**
6.1.1 Componentes del modelo de amenaza 110
6.1.2 Fuentes de incertidumbre en la evaluación de la amenaza sísmica 111
6.1.3 Evaluación de curvas de amenaza 112
6.1.4 Estimación de espectros de amenaza uniforme y mapas de amenaza 114
**6.2 Requerimientos computacionales 114**

7 Resultados del estudio de amenaza sísmica 117
**7.1 Mapas de amenaza en roca firme 117**
7.1.1 Relaciones entre las aceleraciones pico obtenidas con diferentes periodos de retorno 120
7.1.2 Ambientes tectónicos predominantes en la evaluación de la amenaza sísmica 121
**7.2 Curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme 124**
**7.3 Desagregación de la amenaza sísmica 124**

8 Conclusiones y recomendaciones 129
**8.1 Conjunto de datos básicos 130**
**8.2 Modelo de fuentes sísmicas 131**
**8.3 Ecuaciones de atenuación 133**
**8.4 Resultados 133**
**8.5 Recomendaciones 134**

**Referencias 135**

# LISTA DE FIGURAS


**Figura 1.** Mapa de intensidades máximas observadas en Colombia 21

**Figura 2.** **a)** Mapa de intensidades macrosísmicas esperadas; **b)** aceleración pico. Ventana de observación de cien años 22

**Figura 3.** Valores de aceleración horizontal máxima esperada. Tiempo de exposición: 50 años; probabilidad de excedencia de 0,1; corrección por incertidumbre del 90% 23

**Figura 4.** Mapa del valor promedio de aceleraciones pico efectivas. Periodo de retorno 475 años 24

**Figura 5.** Mapa nacional de amenaza sísmica. Periodo de retorno: 475 años 25

**Figura 6.** Aceleración pico para un periodo de retorno de 475 años. **a)** Ecuación de atenuación de Gallego (2000); **b)** ecuación de atenuación de Campbell (1997) y García *et al.* (2005) 26

**Figura 7.** Esquema metodológico del modelo de amenaza sísmica 27

**Figura 8.** Participación de las agencias en términos de magnitud y localización de los eventos 39

**Figura 9.** Soluciones preferidas de los catálogos consultados 40

**Figura 10.** Soluciones preferidas de los catálogos regionales consultados 40

**Figura 11.** Soluciones preferidas del catálogo del Servicio Geológico Colombiano 41

**Figura 12.** Relación entre magnitudes Mw (GCMT) y mb (NEIC-GCMT) en 37.849 eventos 42

**Figura 13.** Relación entre magnitudes Mw (GCMT) y Ms (NEIC-GCMT) en 21.070 eventos 42

**Figura 14.** Relación entre mb (ISC) y ML (SGC) en 1.599 eventos 43

**Figura 15.** Mapa de distribución de epicentros contenidos en el Catálogo Sísmico Integrado. Periodo comprendido entre los años 1610 y 2014 43

**Figura 16.** Ventanas espacio-temporales implementadas en la herramienta HMTK para remover eventos dependientes siguiendo el método propuesto por Gardner y Knopoff (1974) 44

**Figura 17.** Eventos principales resultado de la remoción de eventos dependientes: a) método de Gardner y Knopoff clásico; b) método de Gardner y Knopoff usando la aproximación propuesta por Uhrhammer (1986) 45

**Figura 18.** Variación en el tiempo (años) de la magnitud de completitud ($M_c$) y su desviación estándar ($\sigma_\lambda$) usando el método de Stepp (1972) 46

**Figura 19.** Base de datos de fallas activas del proyecto SARA (v. 1.0). Las estructuras han sido representadas por la traza superficial 48

**Figura 20.** Mapas de fallas cuaternarias 49

**Figura 21.** Base de datos de fallas activas utilizadas en el modelo. Las estructuras han sido representadas por la traza superficial 50

**Figura 22.** **a)** Distribución de los registros de la base de datos de movimiento fuerte. **b)** Distribución de las profundidades de los eventos 51
**Figura 23.** Distribución de magnitudes (Mw) de los eventos seleccionados 51
**Figura 24.** Distribución de mecanismos focales por región tectónica. **a)** Nido. **b)** Cortical. **c)** Interface. **d)** Benioff 52
**Figura 25.** $Vs_{30}$ (m/s) inferido en las estaciones de registro 53
**Figura 26.** a) $Z_1$. b) $Z_{2,5}$ (m) inferido de las estaciones de registro 53
**Figura 27.** Distribución de las estaciones de registro alrededor del arco volcánico 54
**Figura 28.** Esquema de procesamiento de acelerogramas 55
**Figura 29.** Fuentes sismogénicas propuestas por la AIS (2009): **a)** superficiales; **b)** profundas; **c)** zonificación propuesta por el Ingeominas y la Universidad Nacional de Colombia (2010) 58
**Figura 30.** Esquema general de actividades del modelo de fuentes sísmicas 59
**Figura 31.** Tectónica regional 60
**Figura 32.** Configuración neotectónica de la región Caribe y el norte de los Andes 61
**Figura 33.** Mapa del límite de la transición corteza-manto (“moho”) en la región de estudio 62
**Figura 34.** Esquema del proceso de subducción 62
**Figura 35.** Secciones transversales perpendiculares a la trinchera del Pacífico 63
**Figura 36.** Secciones transversales en la localización del nido sísmico de Bucaramanga 64
**Figura 37.** Ambientes tectónicos definidos en el modelo 65
**Figura 38.** Clasificación sismotectónica de los eventos del Catálogo (sin eventos dependientes): **a)** eventos corticales; **b)** eventos de subducción y profundos: interplaca (símbolo verde); intraplaca-zona Benioff (símbolo celeste); nido sísmico de Bucaramanga (símbolo azul oscuro) 66
**Figura 39.** Estructura del modelo según profundidad y tipo de fuentes sísmicas 67
**Figura 40.** Árbol lógico del modelo de fuentes sísmicas adoptado 68
**Figura 41.** Esquema del procedimiento para la definición de la geometría de fuentes sísmicas superficiales 69
**Figura 42.** Modelo de fuentes corticales tipo área propuesto por el SGC-IGME 69
**Figura 43.** Ejemplo de distribución Gutenberg-Richter doblemente truncada 71
**Figura 44.** Ejemplo de fuentes tipo área 72
**Figura 45.** Ejemplo de histogramas de eventos en profundidad 72
**Figura 46.** Ejemplos de análisis de mecanismos focales y orientación preferencial y cinemática 72
**Figura 47.** Parámetro a: fuentes corticales tipo área 73
**Figura 48.** Parámetro b: fuentes corticales tipo área 73

**Figura 49.** Magnitud máxima. Fuentes corticales tipo área 73
**Figura 50.** Modelo de fuentes corticales considerando fuentes tipo falla y modelos de sismicidad distribuida 74
**Figura 51.** Parámetros de sismicidad de macrozonas consideradas en el modelo de sismicidad suavizada 75
**Figura 52.** Ejemplo de fuentes puntuales. **a)** Diferencias según relaciones de escala y de aspecto. **b)** Diferencias según buzamiento**. c)** Rumbo. **d)** Profundidades hipocentrales 76
**Figura 53.** Ejemplo de fuente tipo falla con rupturas flotantes 77
**Figura 54.** Distribución de recurrencia de magnitudes en las fallas activas de la macro zona C02 78
**Figura 55.** Distribución de recurrencia de magnitudes de fallas activas de la macro zona C03 78
**Figura 56.** Parámetros para caracterizar fallas activas 82
**Figura 57.** Mapas con las secciones creadas para para definir la geometría de **a)** subducción Nazca/Suramérica y **b)** sismicidad profunda (Bucaramanga). La escala representa la profundidad de los eventos presentes en el Catálogo 84
**Figura 58.** Ejemplo de secciones creadas para para definir la geometría del proceso de subducción entre las placas Nazca y Suramérica 85
**Figura 59.** Ejemplo de secciones creadas para para definir la geometría de la sismicidad del nido de Bucaramanga 85
**Figura 60.** Tope del volumen de subducción entre las placas Nazca y Suramérica en la región colombo-ecuatoriana: **a)** variaciones en profundidad; **b)** superficie 2,5D obtenida 86
**Figura 61.** Tope del volumen subducido en la región del nido sísmico de Bucaramanga (sismicidad profunda): **a)** variaciones en profundidad; **b)** superficie 2,5D obtenida 86
**Figura 62.** Dimensiones de fuentes interplaca; profundidad de los límites: mínimo y máximo 87
**Figura 63.** Segmentación de la zona de subducción de Colombia 88
**Figura 64.** Parámetros de sismicidad de fuentes interplaca del proceso de subducción del Pacífico: **a)** modelo no segmentado; **b)** modelo segmentado 89
**Figura 65.** Parámetros de sismicidad de fuentes de la zona Benioff 90
**Figura 66.** Parámetros de sismicidad de fuentes del nido de Bucaramanga 90
**Figura 67.** Ejemplo de una falla compleja 91
**Figura 68**. Profundidad de la superficie de fuentes interplaca. Modelo no segmentado 92

**Figura 69.** Vista en planta de la malla que representa la placa en la zona de Benioff, correspondiente a una magnitud de 6,05 Mw 92
**Figura 70.** Malla de puntos de la placa de la zona de Benioff correspondiente a una magnitud de 6,05 Mw 93
**Figura 71.** Procedimiento empleado en la selección de ecuaciones de atenuación 96
**Figura 72.** Tipos de medidas de la distancia entre sitios de análisis y rupturas 99
**Figura 73.** Datos de movimiento fuerte en la zona de Benioff 101
**Figura 74.** Resultados estadísticos de la zona de Benioff 101
**Figura 75.** Datos de movimiento fuerte del nido de Bucaramanga 102
**Figura 76.** Resultados estadísticos del nido de Bucaramanga 103
**Figura 77.** Datos de movimiento fuerte de la zona de Interplaca 104
**Figura 78.** Resultados estadísticos de la zona de interplaca 104
**Figura 79.** Datos de movimiento fuerte en eventos corticales 105
**Figura 80.** Resultados estadísticos de eventos corticales 106
**Figura 81.** Realizaciones para la estimación de la amenaza sísmica 112
**Figura 82.** Componentes del cálculo del modelo de amenaza sísmica 113
**Figura 83.** Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 475 años 119
**Figura 84.** Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 975 años 119
**Figura 85.** Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 2.475 años 119
**Figura 86.** Cociente entre aceleraciones pico correspondientes a diferentes periodos de retorno: **a)** 975/475; **b)** 2.475/475 121
**Figura 87.** Ambiente tectónico de mayor aceleración pico (periodo de retorno de 475 años) 122
**Figura 88.** Ambiente tectónico de segunda mayor aceleración pico (Tr 475 años) 123
**Figura 89.** **a)** Curva de amenaza; **b)** espectro de amenaza uniforme (Tr. 475 años) correspondiente a un punto del municipio de Pasto 124
**Figura 90.** Desagregación de la amenaza sísmica en Pasto según **a)** distancia y **b)** magnitud de las rupturas (TR 475, PGA) 125
**Figura 91.** Resultados de la desagregación de la amenaza sísmica en Popayán según ambientes tectónicos y periodos de vibración de **a)** Tr. = 475 años y **b)** 975 años 125
**Figura 92.** Distribución geográfica de la contribución de las rupturas a la amenaza sísmica de Popayán según ambientes tectónicos **a)** corticales, **b)** interplaca y **c)** zona Benioff. Periodo de retorno: 475 años 126

# LISTA DE TABLAS


**Tabla 1.** Resumen de daños observados en los principales eventos históricos 18
**Tabla 2.** Características generales de la información usada de los catálogos globales y locales en la construcción del catálogo integrado 37
**Tabla 3.** Criterios de priorización para la localización de los sismos 38
**Tabla 4.** Criterios de priorización para la magnitud de los sismos 38
**Tabla 5.** Criterios de priorización según el tipo de magnitud 38
**Tabla 6.** Matriz de prioridad para localización correspondiente a cada uno de los catálogos seleccionados 38
**Tabla 7.** Matriz de priorización por magnitud correspondiente a cada uno de los catálogos seleccionados 39
**Tabla 8.** Número de eventos aportados por agencia luego de la priorización 39
**Tabla 9.** Relaciones obtenidas entre magnitud Mw (GCMT) y mb (NEIC-GCMT) 42
**Tabla 10.** Relaciones obtenidas entre magnitudes Mw (GCMT) y ms (NEIC-GCMT) 42
**Tabla 11.** Relaciones entre magnitudes Mb (ISC) y ML (SGC) 43
**Tabla 12.** Características generales del Catálogo Final Integrado 43
**Tabla 13.** Clasificación sismo-tectónica de la sismicidad de eventos del catálogo (sin eventos dependientes), según modelos de fuentes 45
**Tabla 14.** Rangos de completitud correspondientes al Catálogo Integrado del SGC 47
**Tabla 15.** Estructura de la base de datos paramétrica de las fallas activas 48
**Tabla 16.** Registros acelerográficos por ambiente tectónico 50
**Tabla 17.** Número y tipos de mecanismos focales por región tectónica 52
**Tabla 18.** Número de eventos por rango de $Vs_{30}$ y fuente sísmica 54
**Tabla 19.** Clasificación sismo-tectónica de la sismicidad de eventos del catálogo (sin eventos dependientes), según modelos de fuentes 66
**Tabla 20.** Ejemplo de descripción de una zona sismogénica 70
**Tabla 21.** Principales parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas pertenecientes al modelo zonificado de fuentes corticales 71
**Tabla 22.** Parámetros principales de las macrozonas consideradas en el modelo de sismicidad distribuida (tipo Kernel) 75
**Tabla 23.** Parámetros principales de las fuentes sísmicas tipo fallas simples, pertenecientes al modelo cortical 79
**Tabla 24.** Características de los segmentos de la zona de subducción 89
**Tabla 25.** Ecuaciones preseleccionadas para eventos corticales 97
**Tabla 26.** Ecuaciones pre seleccionadas para eventos de Interplaca 98
**Tabla 27.** Ecuaciones pre seleccionadas para eventos de Intraplaca. 98
**Tabla 28.** Parámetros de evaluación 100
**Tabla 29.** Pesos del árbol lógico de ecuaciones de atenuación correspondiente a la zona de Benioff 100

**Tabla 30.** Pesos definitivos del árbol lógico de ecuaciones de atenuación correspondiente al nido de Bucaramanga 102
**Tabla 31.** Pesos definitivos del árbol lógico de ecuaciones de atenuación correspondiente a la zona de Interplaca 103
**Tabla 32.** Pesos definitivos del árbol lógico de ecuaciones de atenuación de eventos corticales 105
**Tabla 33.** Modelo de fuentes sísmicas 110
**Tabla 34.** Árbol lógico de ecuaciones de atenuación de cada ambiente tectónico 111
**Tabla 35.** Aceleración pico en roca estimada en capitales departamentales y para diferentes periodos de retorno 120
**Tabla 36.** Descripción general de los eventos de la base de datos de movimiento fuerte 130
**Tabla 37.** Resumen del árbol lógico de fuentes sísmicas 132
**Tabla 38.** Resumen del árbol lógico de ecuaciones de atenuación 133

# LISTA DE ANEXOS


| | | |
|---|---|---|
| **A** | Catálogos sísmicos utilizados | 149 |
| **B** | Base de datos de movimiento fuerte | 155 |
| **C** | Metodología adoptada para la corrección de línea base y filtrado de acelerogramas | 159 |
| **D** | Distribuciones de magnitud-frecuencia en fuentes corticales tipo área | 163 |
| **E** | Distribuciones de magnitud-frecuencia en macrozonas del modelo de sismicidad suavizado | 169 |
| **F** | Distribuciones de magnitud-frecuencia en fallas activas | 173 |
| **G** | Distribuciones de magnitud-frecuencia en fuentes interplaca (subducción), Benioff y nido sísmico de Bucaramanga | 203 |
| **H** | Metodologías utilizadas en la selección ecuaciones de atenuación | 207 |
| **I** | Propiedades geométricas utilizadas en ecuaciones de atenuación | 213 |
| **J** | Resultados de la selección de ecuaciones de atenuación según ambiente tectónico | 244 |
| **K** | Resultados de amenaza sísmica para las capitales departamentales | 265 |
| **L** | Descripción del sistema de consulta del modelo y de los resultados de la amenaza sísmica | 299 |

# Presentación

Colombia ocupa un territorio en el que las fuerzas de la naturaleza y su expresión geológica producen eventos que pueden ser peligrosos para la población. Este ambiente es un reto que demanda al país (y a nosotros, como ciudadanos) los mejores esfuerzos para entender la dinámica de la tierra, de tal forma que podamos diseñar nuestras ciudades e infraestructura de la mejor manera posible, valiéndonos del conocimiento disponible.

En este camino de aprendizaje, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha sido encargado, por medio del Decreto 2703 de 2013, de una importante misión respecto al conocimiento e investigación de amenazas de origen geológico y del riesgo físico asociado. Esto significa que no solo debemos preocuparnos por los eventos detonantes (los sismos, los volcanes), sino también por las potenciales consecuencias y daños esperados.

En particular, el SGC es responsable de la producción de lineamientos para evaluar tales amenazas, así como del apoyo a entes territoriales e instituciones del Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres y del Sistema Nacional Ambiental sobre análisis de la amenaza y riesgo físico, y de su incorporación en la planificación y el ordenamiento territorial.

En cumplimiento de estas responsabilidades, desde hace varios años el SGC ha venido trabajando con compromiso y rigor en el conocimiento y modelación de la amenaza sísmica. Esto ha implicado la revisión y discusión del catálogo de eventos sísmicos, la delimitación juiciosa de las zonas que producen terremotos, así como la evaluación y selección de las ecuaciones que relacionan la magnitud de los sismos con las intensidades (aceleraciones, velocidades) que pueden llegar a presentarse en cualquier punto del territorio.

El reto del conocimiento de la amenaza y del riesgo sísmico lo asumimos con legitimidad y observancia científica. Somos conscientes de que el conocimiento no nace de una sola organización y que debe construirse con el aporte de una comunidad técnica. A la vez, la curiosidad propia de los investigadores y el deseo de un mejor conocimiento han permitido que el SGC explore metodologías novedosas y establezca alianzas con expertos nacionales e internacionales para desarrollar un modelo de amenaza sísmica nacional. Teniendo en cuenta estos preceptos, queremos proveer a los tomadores de decisiones la mejor información existente sobre la amenaza y el riesgo sísmico.

Cada estructura que edificamos, nuestras viviendas, los edificios en donde trabajamos, los puentes por los que transitamos, la infraestructura de servicios públicos, etc., en algún momento de la historia podrán ser puestos a prueba por la ocurrencia inesperada de un sismo, y de su resistencia dependerá la seguridad de la vida de todos. Por lo tanto, como comunidad debemos tejer el conocimiento sobre el riesgo sísmico con un hilo que conecte los movimientos telúricos con nuestra ocupación del territorio, el diseño de estructuras y la seguridad de la población.

Finalmente, los invito a usar con sentido crítico los resultados de este estudio. Las observaciones y los aportes para mejorar este modelo son bienvenidos, al igual que la discusión de la información aquí consignada.

**Oscar Paredes Zapata**
Director general Servicio Geológico Colombiano

# Agradecimientos y reconocimientos

El equipo agradece especialmente a Oscar Paredes Zapata, director general del Servicio Geológico Colombiano, y a Marta Lucía Calvache Velasco, directora técnica de Geoamenazas, por su apoyo incondicional para la elaboración de esta publicación.

Igualmente, agradece a Diana Rocío Barbosa Castro y a Héctor José Pérez Barrera por su colaboración durante este proceso, y al grupo de Evaluación y Monitoreo de la Actividad Sísmica del Servicio Geológico Colombiano.

Esta publicación utiliza datos obtenidos y resultados generados en el desarrollo de los convenios especiales de cooperación suscritos entre el Servicio Geológico Colombiano y la Fundación Global Earthquake Model entre 2016 y 2018.

El documento final se estructuró en 2018, en 2019 se oficializó, se entregó a las autoridades, se complementaron los resultados para las ciudades capitales y se adaptó la versión para publicar el documento. En 2020 se generó el proceso para publicación, revisión de estilo, diseño y diagramación.

# 1

# Introducción

De manera general, la amenaza sísmica representa la severidad y la frecuencia de los sismos que pueden ocurrir en un determinado sitio. En el caso de Colombia, la amenaza sísmica está asociada a la convergencia de las placas litosféricas de Nazca, Sudamérica y Caribe, cuya compleja dinámica da origen a sismos de diferentes características a lo largo del territorio nacional, que pueden tener un alto potencial destructivo.

Como respuesta a la ocurrencia de sismos y de sus efectos devastadores, en los últimos cincuenta años se han llevado a cabo esfuerzos con el fin de construir catálogos de sismos, identificar fuentes sísmicas, desarrollar redes de monitoreo sísmico y elaborar modelos de amenaza.

Entre los eventos más recientes y de mayores efectos se encuentran los sismos de Popayán de 1983 (magnitud 5,6 Mw) y el sismo del eje cafetero, del 25 de enero de 1999 (magnitud 6,1 Mw), que en gran parte causaron una amplia destrucción de edificios e infraestructura, cuyos impactos sociales y económicos fueron notables para el país. Tales eventos señalaron la importancia de un trabajo continuo tanto en el conocimiento de la amenaza sísmica como en las medidas de protección ante estos eventos.

En lo que respecta al conocimiento de la amenaza sísmica, el Servicio Geológico Colombiano, como instituto científico y técnico del Gobierno nacional, tiene a su cargo la investigación de los procesos geológicos generadores de amenazas y la evaluación de las amenazas que estos representan a escalas nacional y regional, entre ellas la amenaza sísmica. Asimismo, se encarga de proponer, evaluar y difundir metodologías de evaluación de amenazas con afectaciones departamentales y municipales. Igualmente, busca proveer información sobre las amenazas y el riesgo físico de origen geológico entre las instancias y autoridades competentes y la comunidad, con fines de planificación, ordenamiento territorial y gestión del riesgo.

En el marco de sus funciones, el SGC, en conjunto con la Fundación Global Earthquake Model, elaboró un modelo nacional de amenaza sísmica. Mediante este modelo se busca zonificar y analizar la recurrencia de sismos de diferentes características (p. ej., su magnitud), así como estimar las intensidades del movimiento que tales eventos podrían producir en el territorio nacional (p. ej., aceleraciones). A partir de esta información, y con una metodología probabilista, la amenaza sísmica de un sitio específico se mide en términos de la probabilidad de que el movimiento sobrepase una determinada intensidad, considerando un periodo de observación dado.

En este capítulo se presenta una descripción de los principales sismos ocurridos en el país, de tal manera que se pueda tener una aproximación a la distribución geográfica de la amenaza. A la vez, se presentan las principales experiencias de modelación de la amenaza sísmica, con el fin de identificar los logros alcanzados en estudios previos, así como de exponer los aportes de este estudio.

## 1.1 Principales sismos ocurridos en el país

La tabla 1 presenta descripciones de algunos de los daños observados en los principales sismos ocurridos en Colombia. Tales sismos se seleccionaron teniendo en cuenta el número de reportes del evento y sus magnitudes e intensidades macrosísmicas estimadas. La descripción de daños se realizó a partir de los datos disponibles en el Sistema de Información de Sismicidad Histórica de Colombia del SGC (SGC, s/f).

**Tabla 1.** Resumen de daños observados en los principales eventos históricos

| Fecha | Magnitud (Mw) | Sitio relacionado | Descripción de daños |
|---|---|---|---|
| 1644/01/16 | 6,5 | Pamplona (Norte de Santander) | Destrucción generalizada en Pamplona (Norte de Santander) y San Cristóbal (Venezuela). Colapsos de iglesias de estas ciudades. |
| 1827/11/16 | 7,1 | Altamira (Huila) | Se considera uno de los sismos más destructivos del país, cuyos efectos más graves se observaron en el departamento del Huila. Se presentaron colapsos de la mayoría de las viviendas en los municipios de Timaná, Tarquí y Garzón. En otros municipios, como Gigante, Guadalupe, Palermo, Villavieja y Acevedo, se presentaron daños en numerosas viviendas y en las iglesias. Este evento detonó un conjunto de deslizamientos y represamientos en diferentes cuerpos de agua que, a su vez, generaron flujos de lodo que afectaron otras poblaciones. |
| 1875/05/18 | 6,8 | Cúcuta (Norte de Santander) | Destrucción casi total de los municipios de Cúcuta y Villa del Rosario (Norte de Santander), así como de poblaciones limítrofes con Venezuela. Hubo daños considerables en Pamplona, Cucutilla, Chinácota, Matanza y en otras poblaciones del estado del Táchira, como San Cristóbal, Colón, Palmira y Tariba. Se presentaron licuaciones de suelo en Cúcuta, Villa del Rosario, Ureña y San Antonio, en la vega de los ríos Pamplonita y Táchira. |
| 1906/01/31 | 8,8 | Costa pacífica, Pacífico | Los daños más notables ocasionados, tanto por el sismo como por el consecuente tsunami, se presentaron en las costas de los departamentos de Nariño y Cauca (Colombia), y en la provincia de Esmeraldas (Ecuador). Playas de municipios como Tumaco, Francisco Pizarro (Salahonda), Mosquera, Olaya Herrera (Bocas de Satinga), La Tola, El Charco, Santa Bárbara (Iscuandé), Guapi y Timbiquí quedaron sumergidas por las olas del tsunami, el cual causó numerosas muertes. |
| 1917/08/31 | 6,7 | Villavicencio (Meta) | La mayoría de las construcciones de Villavicencio y del municipio de San Martín quedaron averiadas; asimismo, se presentaron algunos colapsos en San Martín y Cáqueza. En Bogotá se registraron más de trescientas edificaciones averiadas y cerca de cuarenta destruidas. Adicionalmente, este evento detonó movimientos en masa que afectaron diferentes poblaciones. |
| 1938/02/04 | 7,0 | Eje cafetero | Se presentaron colapsos en los municipios de Aguadas (Caldas), Santa Rosa de Cabal (Risaralda), Salento (Quindío) y en pueblos del sur de Antioquia, como Santa Bárbara, Támesis y Mesopotamia. El sismo causó daños leves en municipios alejados del epicentro, tales como Quibdó, Tunja, Bogotá, Popayán, Cúcuta y Bucaramanga, entre otros. |

(…/…)

| Fecha | Magnitud (Mw) | Sitio relacionado | Descripción de daños |
|---|---|---|---|
| 1947/07/14 | 6,0 | Pasto (Nariño) | En el municipio de Pasto se presentaron daños en edificios públicos y de atención a la comunidad, tales como el Hospital San Pedro (que tuvo que ser demolido), el Palacio Municipal, el Palacio de la Gobernación, la plaza de mercado, el Matadero Municipal, la Universidad de Nariño y el colegio San Francisco Javier. También se presentaron daños en las torres y estructura de las iglesias de San Felipe, Pandiaco y Santiago. Por otro lado, se demolieron cerca de quinientas casas de adobe o de ladrillo sin refuerzo, que resultaron afectadas. |
| 1950/07/08 | 6,1 | Arboledas, (Norte de Santander) | En los municipios de Arboledas y Cucutilla, la mayoría de edificaciones quedaron inservibles, y muchas quedaron destruidas completamente. En los corregimientos de Villa Sucre y San José de la Montaña se presentaron múltiples colapsos, así como daños en viviendas rurales. En el municipio de Salazar todas las casas resultaron agrietadas. |
| 1962/07/30 | 6,5 | Eje cafetero | Se presentaron colapsos de edificaciones en zonas en que la mayoría de viviendas eran de tapia y bahareque, en los municipios del sur de Antioquia (Sonsón, Nariño y Valparaíso), en Caldas (Aguadas, Pácora, Anserma), en Risaralda (Quinchía) y en el Valle del Cauca (El Águila y Ansermanuevo). Se reportaron daños moderados en poblaciones de Tolima y Cauca. |
| 1967/02/09 | 7,0 | Colombia (Huila) | Los daños más significativos ocurrieron en el departamento del Huila, en los municipios de Colombia y Campoalegre, donde muchas viviendas y edificios públicos colapsaron, y el resto de construcciones presentaron averías.<br>En Neiva, Altamira y Suaza se reportó la destrucción de viviendas, así como agrietamiento de muros y techos de varias edificaciones. Se estima que en el departamento del Huila resultaron destruidos o averiados cerca de 8.000 inmuebles, incluyendo casas, edificios públicos, colegios, cuarteles de policía e iglesias. |
| 1967/07/29 | 6,8 | Betulia (Santander) | Algunas viviendas de tapia pisada, así como escuelas, iglesias y edificios públicos, colapsaron en los municipios de Betulia, Hato, Zapatoca, Mogotes, San Vicente de Chucurí, Galán, El Guacamayo, San Joaquín y Palmar. |
| 1976/07/11 | 7,3 | Darién (Colombia) y Darién (Panamá) | En el municipio de Juradó varias viviendas y escuelas quedaron seriamente averiadas. En Riosucio, Bojayá y Bahía Solano se produjeron agrietamientos en los muros de algunas casas. Se evidenciaron efectos de licuación de suelos y deslizamientos a lo largo de la costa en dirección a la frontera con Colombia, que afectaron varios cultivos. |
| 1979/11/23 | 7,2 | Eje cafetero | En Manizales se presentó el colapso de algunas viviendas y de un colegio y quedaron averiados importantes edificios. El sismo detonó un deslizamiento que derrumbó algunas viviendas.<br>En Jardín y Andes colapsaron varias casas y los templos quedaron semidestruidos. En Pereira, Aguadas, Pueblo Rico, Támesis, Sonsón y Valparaíso resultaron destruidas pocas viviendas.<br>En Medellín resultaron averiados un hospital, un teatro y varias casas. En Cali, numerosas casas, una iglesia y edificios de oficinas presentaron daños considerables. En Armenia se agrietaron considerablemente algunas construcciones.<br>En Arma (corregimiento de Aguadas) se presentó un deslizamiento en el casco urbano que destruyó varias viviendas situadas alrededor de la plaza principal. |
| 1979/12/12 | 8,1 | Costa pacífica, Pacífico | Este sismo generó un tsunami que afectó toda la costa comprendida entre Guapi, al norte, y Tumaco, al sur, cuyas olas causaron destrucción de construcciones y viviendas y serios efectos en la población. |
| 1983/03/31 | 5,6 | Popayán (Cauca) | Este sismo afectó al departamento del Cauca, principalmente las poblaciones de Cajete, Cajibío, Julumito, Popayán y Timbío. Se estima que en el departamento del Cauca 4.964 construcciones quedaron destruidas y 13.796 viviendas presentaron daños muy graves. En Popayán, gran parte del patrimonio histórico arquitectónico del centro de la ciudad presentó daños profundos y colapsos; asimismo, se presentaron daños considerables en tuberías de agua potable. En los municipios de Cajete y Cajibío se estimó una destrucción del 80%. |

(…/…)

| Fecha | Magnitud (Mw) | Sitio relacionado | Descripción de daños |
|---|---|---|---|
| 1992/10/18 | 7,1 | Murindó (Antioquia) | En Murindó y en el pueblo indígena La Isla (Murindó) se presentó destrucción total de casi todas las construcciones. En Bojayá y Belén de Bajirá (departamento del Chocó), colapsaron viviendas. Otros daños graves se registraron en las poblaciones de Bejuquillo, Buchadó, Cañasgordas, Dabeiba, Mutatá, Pavarandocito, San José de Urama y Vigía del Fuerte (departamento de Antioquia). A raíz de los destrozos ocasionados por este evento se vio la necesidad de reubicar a los habitantes de Murindó.<br>Este sismo detonó fenómenos de licuación de suelos y procesos de remoción en masa que abarcaron una extensión de cientos de kilómetros del Atrato medio y el Urabá antioqueño.<br>A la vez, este sismo detonó la explosión del volcán de lodo Cacahual, localizado en el municipio de Turbo. Tal erupción sepultó algunas viviendas y causó daños en la cobertura vegetal, cultivos y ecosistemas. |
| 1995/01/19 | 6,5 | Tauramena (Casanare) | Se presentaron colapsos y daños severos en las construcciones, especialmente en el área rural de los municipios de San Luis de Gaceno, Páez y Campohermoso, en Boyacá, y Sabanalarga y Monterrey, en Casanare. En el área epicentral ocurrieron numerosos deslizamientos de diferente tipo que afectaron viviendas, vías y cultivos. |
| 1995/02/08 | 6,4 | Calima (Darién), Valle del Cauca | Los municipios más afectados fueron El Cairo, La Unión, Bolívar, Trujillo, Calima y Ansermanuevo (Valle del Cauca). En Dosquebradas y Pereira (Risaralda), al igual que en San José del Palmar y Sipí (Chocó) se presentaron daños considerables en las construcciones. |
| 1999/01/25 | 6,1 | Eje cafetero | Este sismo produjo daños graves en municipios de los departamentos de Quindío, Caldas, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca.<br>De acuerdo con el informe elaborado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 1999), cerca del 84% de las construcciones escolares presentaron daños mayores y colapsos. En el caso de instalaciones de salud, 61 resultaron dañadas, de las cuales 52 presentaron daños leves, una necesitó una reconstrucción parcial y ocho tuvieron que ser demolidas para su total reconstrucción. En cuanto a los daños a las viviendas, cerca de 79.500 resultaron afectadas, de las cuales casi 43.500 presentaron daños parciales y alrededor de 36.000 quedaron entre inhabitables y destruidas. |
| 2004/11/15 | 7,2 | Bajo Baudó (Pizarro, Chocó) | En el municipio de Bajo Baudó (Chocó), así como en varios caseríos aledaños se presentó la destrucción de viviendas, colapsos de escuelas y puentes, así como daños en capillas y puestos de salud.<br>En Buenaventura se presentó el colapso de construcciones, la mayoría de ellas palafíticas. En la zona epicentral se presentaron fenómenos de licuación y agrietamiento del suelo, e inundaciones temporales asociadas a licuación. |

Los daños presentados en la tabla 1 permiten hacerse una idea aproximada sobre el potencial destructivo de los sismos en Colombia, así como una distribución geográfica de las zonas históricamente más afectadas. Se destacan el departamento de Norte de Santander, en la frontera con Venezuela, la región del eje cafetero y la costa pacífica (al sur, entre Nariño y Cauca, así como al norte, en el departamento de Chocó). También se observan eventos importantes en los departamentos de Huila y Meta.

Con el fin de brindar una visión más completa de los eventos sísmicos históricos, la figura 1 presenta un mapa de intensidades máximas observadas en el país (SGC, 2015). Esta figura resulta de la identificación, en cada punto de análisis, de las intensidades macrosísmicas máximas estimadas para todos los eventos compilados en la Base de Datos de Sismicidad Histórica del SGC.

La figura 1 revela que las zonas con mayores intensidades (en la Escala Macrosísmica Europea) son similares a las descritas en la tabla 1. Se resalta que a pesar de que este mapa no refleja información sobre la frecuencia de ocurrencia de los sismos, presenta un resumen de la distribución geográfica de los eventos y de su impacto, que puede ser útil para entender la amenaza sísmica.

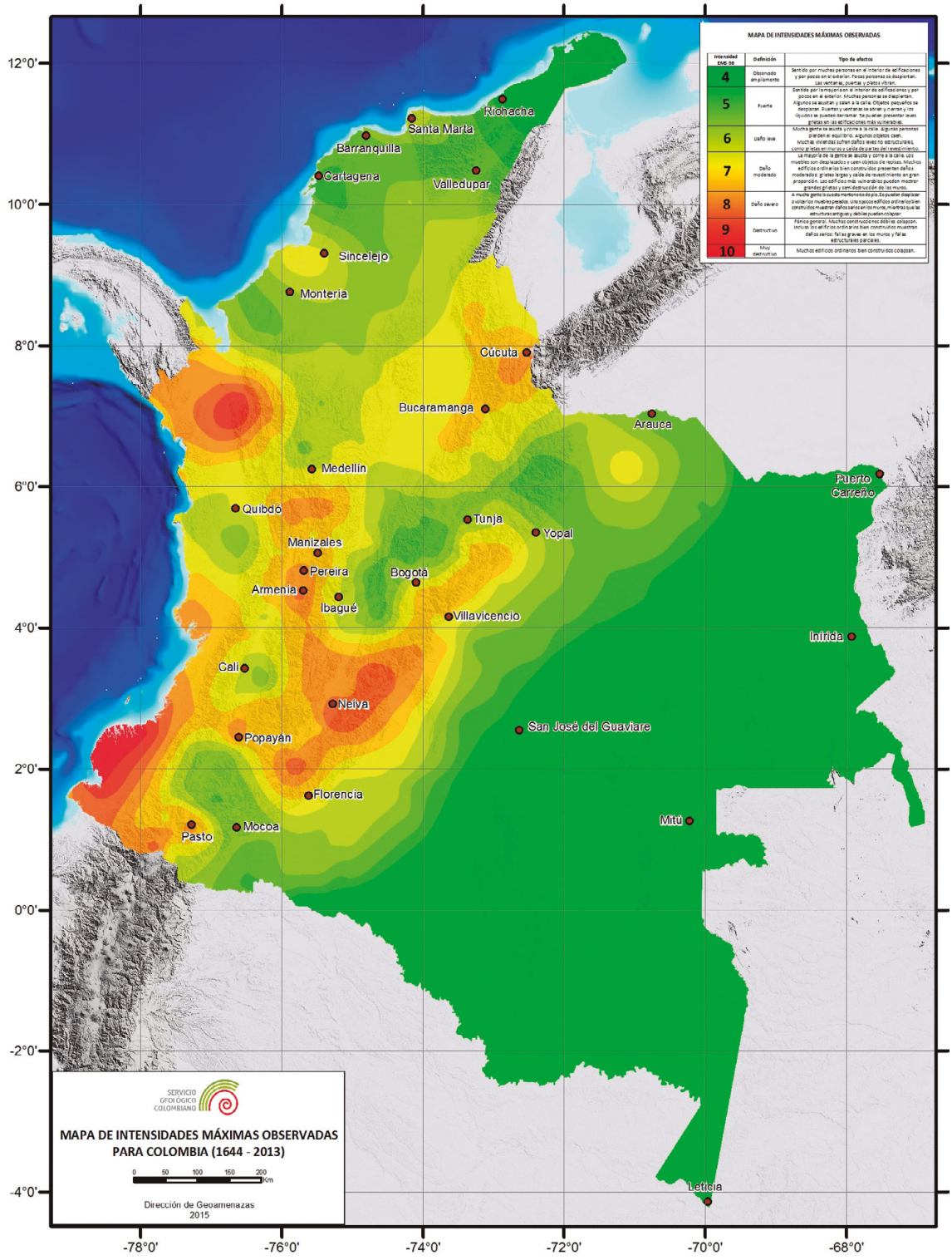



**Figura 1.** Mapa de intensidades máximas observadas en Colombia

**Fuente:** SGC (2015)

## 1.2 Estudios previos de amenaza sísmica

Teniendo en cuenta la historia sísmica y el potencial destructivo de los sismos ocurridos en el país, es evidente la necesidad de desarrollar modelos de amenaza que permitan estimar las posibles intensidades del movimiento y los efectos a los que pueden estar expuestas la población y la infraestructura.

El estudio de la amenaza sísmica en el país ha sido un esfuerzo constante desde hace más de cincuenta años. Respecto al desarrollo de catálogos sísmicos, Ramírez y Forero Durán (1957) elaboraron un mapa sísmico y tectónico de Colombia en el que incluyeron los epicentros de los principales sismos ocurridos entre 1566 y 1956, así como la localización y características de las fallas.

Entre los primeros estudios de amenaza se encuentra el mapa elaborado por Estrada Uribe y Ramírez (1977), en el que se presentan intensidades macrosísmicas esperadas en una ventana de observación de cien años. Los valores de la figura 2b fueron obtenidos transformando la intensidad macrosísmica de Mercalli Modificada (MMI) del mapa presentado en la figura 2a, en aceleraciones pico, usando la relación propuesta por Wald *et al.* (1999).

En la figura 2 se observa que las mayores intensidades macrosísmicas (cercanas a 8), se identificaron hacia el suroccidente del país. Las zonas de intensidades cercanas a 7 cubren la cordillera de los Andes. Por último, en las zonas de los Llanos Orientales y de la Amazonia, así como en la costa atlántica, se obtuvieron los menores valores de la intensidad esperada. En términos de aceleraciones pico, en un periodo de observación de cien años se encuentra que pueden variar entre 0,4 y 0,5 g en las zonas de mayor aceleración, entre 0,3 y 0,4 g en las zonas de cordillera, y menores de 0,2 g en las zonas de la región amazónica.

**(a)** Intensidades macrosísmicas **(b)** Aceleración pico

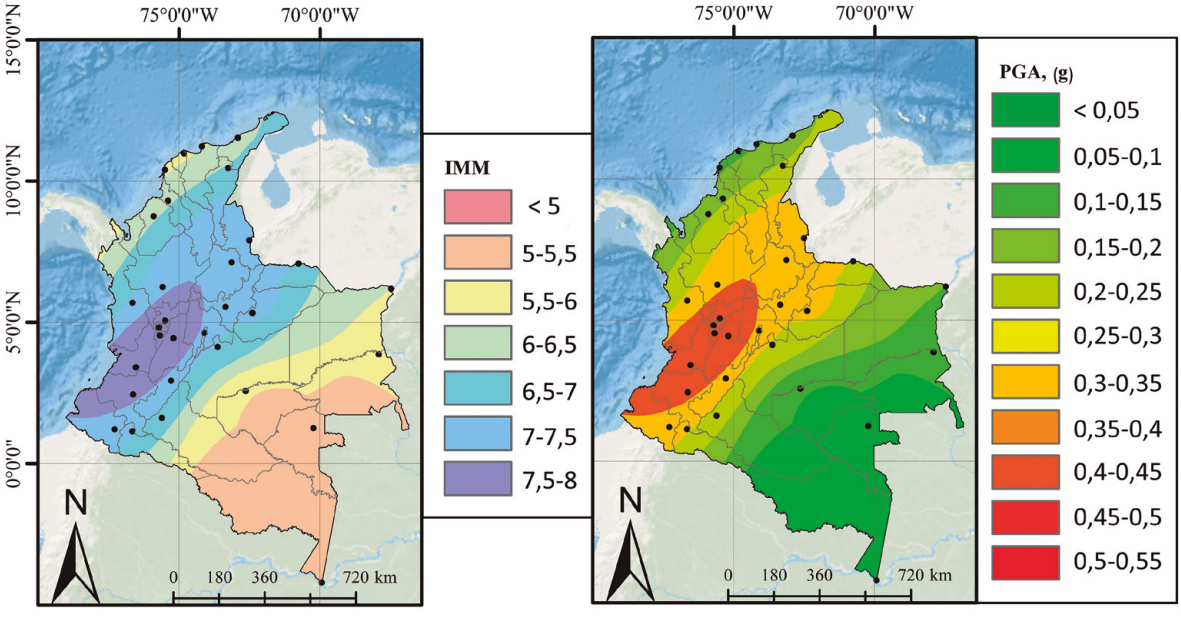



**Figura 2. a)** Mapa de intensidades macrosísmicas esperadas; **b)** aceleración pico. Ventana de observación de cien años
**Nota:** Se resalta que el mapa del valor esperado de las intensidades de la figura 2 corresponde a los valores interpolados obtenidos de las isolíneas de intensidades macrosísmicas evaluadas por Estrada y Ramírez (1977); por lo tanto, pueden presentarse diferencias con los valores originales. Esta figura se considera de referencia. Mayores detalles de evaluaciones de amenaza realizadas entre 1972 y 1996 se presentan en AIS *et al.* (1996).
**Fuente:** tomado y modificado de AIS *et al.* (1996)

Como respuesta a los daños del terremoto de Popayán de 1983, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) llevó a cabo un análisis probabilista de amenaza. En dicho estudio se utilizó un catálogo de sismos compilado y procesado por el Instituto Geofísico de los Andes y la firma ITEC Ltda. para el Centro Regional de Sismología para América del Sur (Ceresis). Los sismos reseñados en dicho catálogo se asignaron a 22 fuentes símicas que comprenden las zonas de subducción y Benioff, así como un conjunto de fallas geológicas. Por su parte, para el cálculo de intensidades del movimiento se utilizaron las ecuaciones de atenuación de Donovan (1973) y McGuire (1974). Mayores detalles de este estudio se encuentran en García *et al.* (1984).

En la figura 3 se presentan valores interpolados de la aceleración horizontal máxima esperada, considerando un periodo de exposición de 50 años, una probabilidad de excedencia del 10% y una corrección por incertidumbre del 90%, que corresponden a un periodo de retorno de 475 años.

Los resultados del estudio de García *et al.* (1984) sirvieron de referencia para definir los mapas de coeficientes de aceleración pico efectiva (Aa) del Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (CCCSR-84), adoptado mediante el Decreto 1400/1984.

Se resalta que en la obtención de coeficientes de diseño sismorresistente se involucran, además de los análisis de amenaza sísmica, criterios de índole económica, social e ingenieril. Por esta razón, los mapas de coeficientes sísmicos de las normas sismorresistentes pueden ser diferentes de los resultados "crudos" obtenidos de la modelación de la amenaza.

En la figura 3 se encuentra que la distribución geográfica de la amenaza considerada para la elaboración del CCSR-84 se asemeja más a la historia de eventos descrita según las intensidades máximas observadas (véase la figura 1), lo cual se explica, en parte, por el uso de un catálogo sísmico.

Posteriormente, en 1996 el Comité AIS 300, con la participación de la Universidad de los Andes y del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas, hoy Servicio Geológico Colombiano), llevaron a cabo un estudio probabilista de la amenaza sísmica (véanse detalles en AIS *et al.*, 1996).

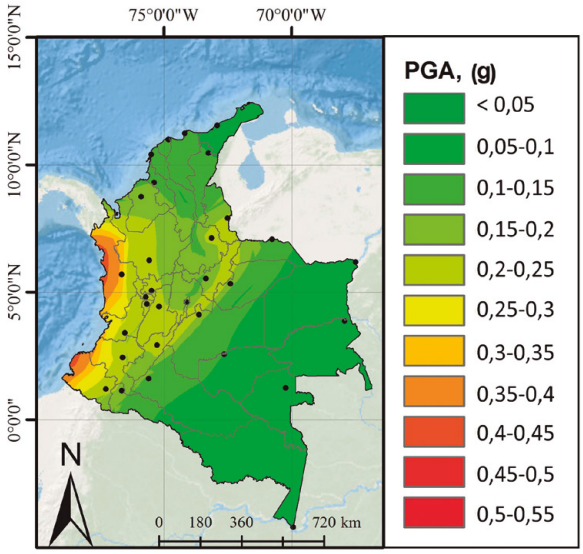



**Figura 3.** Valores de aceleración horizontal máxima esperada. Tiempo de exposición: 50 años; probabilidad de excedencia de 0,1; corrección por incertidumbre del 90%
**Nota:** La figura 3 corresponde a los valores interpolados de las isolíneas de aceleración horizontal máxima esperada (figura 6.3 de García *et al.*, 1984). Pueden presentarse diferencias con los valores originales estimados en dicho estudio. Estos valores se consideran de referencia.
**Fuente:** tomado y modificado de García *et al.* (1984)

En ese estudio se elaboró un catálogo de eventos sísmicos en el que se integraron diferentes fuentes de información, entre ellas, catálogos de estudios previos y los datos provenientes de la Red Sismológica Nacional del Ingeominas. En el análisis se consideraron 32 sistemas de fallas y se utilizaron las ecuaciones de atenuación propuestas por Donovan (1973) y McGuire (1974).

En cuanto al cálculo de la amenaza, se establecieron diferentes alternativas para la asignación de eventos a las fuentes sísmicas (fallas), así como para la estimación de la magnitud máxima de las fuentes a partir de relaciones empíricas entre la longitud de ruptura de la falla y la magnitud máxima. De esta manera, se realizaron veinticinco evaluaciones de la amenaza según diferentes alternativas de análisis.

La Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes se apoyó

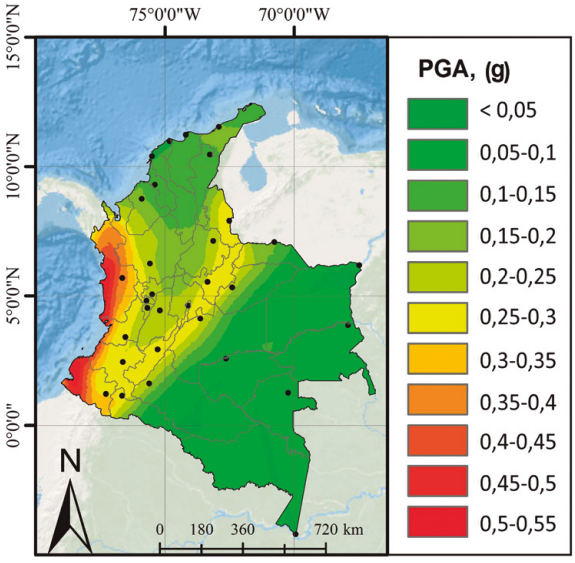



**Figura 4.** Mapa del valor promedio de aceleraciones pico efectivas. Periodo de retorno 475 años
**Nota:** La figura 4 corresponde a los valores interpolados obtenidos de las isolíneas de aceleración pico efectivas (valor promedio) presentadas en el anexo L (figura L.5) del *Estudio general de amenaza sísmica* (AIS *et al.*, 1996). Por lo tanto, pueden presentarse diferencias con los valores originales estimados en dicho estudio.
**Fuente:** tomado y modificado de AIS *et al.* (1996)

en los resultados de ese estudio para definir los coeficientes sísmicos de diseño de la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98. La figura 4 presenta los valores promedio (crudos) de la aceleración pico efectiva correspondientes a un periodo de retorno de 475 años. Esos valores sirven de referencia para conocer la distribución geográfica de la amenaza sísmica.

En la figura 4 se observan similitudes con el modelo planteado para el CCSR-84 en términos de que la mayor peligrosidad se centra en la costa pacífica, donde se observan valores de aceleración pico efectiva de hasta 0,5 g, considerando un periodo de retorno de 475 años. Para la zona de Santander y Norte de Santander se estimaron valores de aceleración pico efectiva cercanos a 0,3 g.

Con posterioridad a las modelaciones de amenaza para la NSR-98, el SGC y la Universidad Nacional de Colombia llevaron a cabo un modelo de amenaza sísmica según un enfoque probabilista, que se construyó a partir de información histórica, instrumental, geológica y sismotectónica, y considerando la base de datos de sismos disponible en aquella época (Ingeominas y Universidad Nacional de Colombia, 2010).

En ese estudio se realizó una depuración y análisis de un catálogo sísmico utilizando la información más reciente de la Red Sismológica Nacional del SGC. Por su parte, la sismicidad del país se clasificó en los siguientes ambientes tectónicos: zona cortical (superficial), zona de subducción y de sismicidad intermedia (sobre el nido sísmico de Bucaramanga). La figura 5 presenta los resultados de aceleración pico obtenidos para un periodo de retorno de 475 años.

Por su parte, el Comité AIS 300 realizó una evaluación de la amenaza sísmica nacional con el fin de definir los movimientos sísmicos de diseño del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (véase AIS, 2009; MAVDT, 2010).

En AIS (2009) se depuró el catálogo sísmico suministrado por el Ingeominas en 2009. Las fuentes sísmicas superficiales se modelaron como "corredores" (de 60 km de ancho) a lo largo de las principales fallas identificadas (fuentes tipo área). También se consideraron fuentes tipo área para modelar fuentes profundas asociadas a los procesos de subducción del Pacífico, a la zona de Benioff y al nido sísmico de Bucaramanga.

Para cada ambiente se llevó a cabo una revisión y selección de ecuaciones de atenuación según una evaluación del sesgo y de la desviación estándar de los residuales obtenidos entre las aceleraciones observadas y las estimadas mediante las ecuaciones de atenuación. Como resultado, se seleccionaron las ecuaciones de Campbell (1997) para las zonas cortical y de subducción, y de García *et al.* (2005) para la zona de Benioff.

A pesar de que las ecuaciones de Gallego (2000) no presentaban el mejor comportamiento (según el análisis de sesgos realizado), fueron seleccionadas, tal como lo señalan los autores del estudio AIS (2009), por haber sido ampliamente usadas en estudios previos y debido a su buen comportamiento respecto a las intensidades observadas durante el sismo del eje cafetero de 1999.

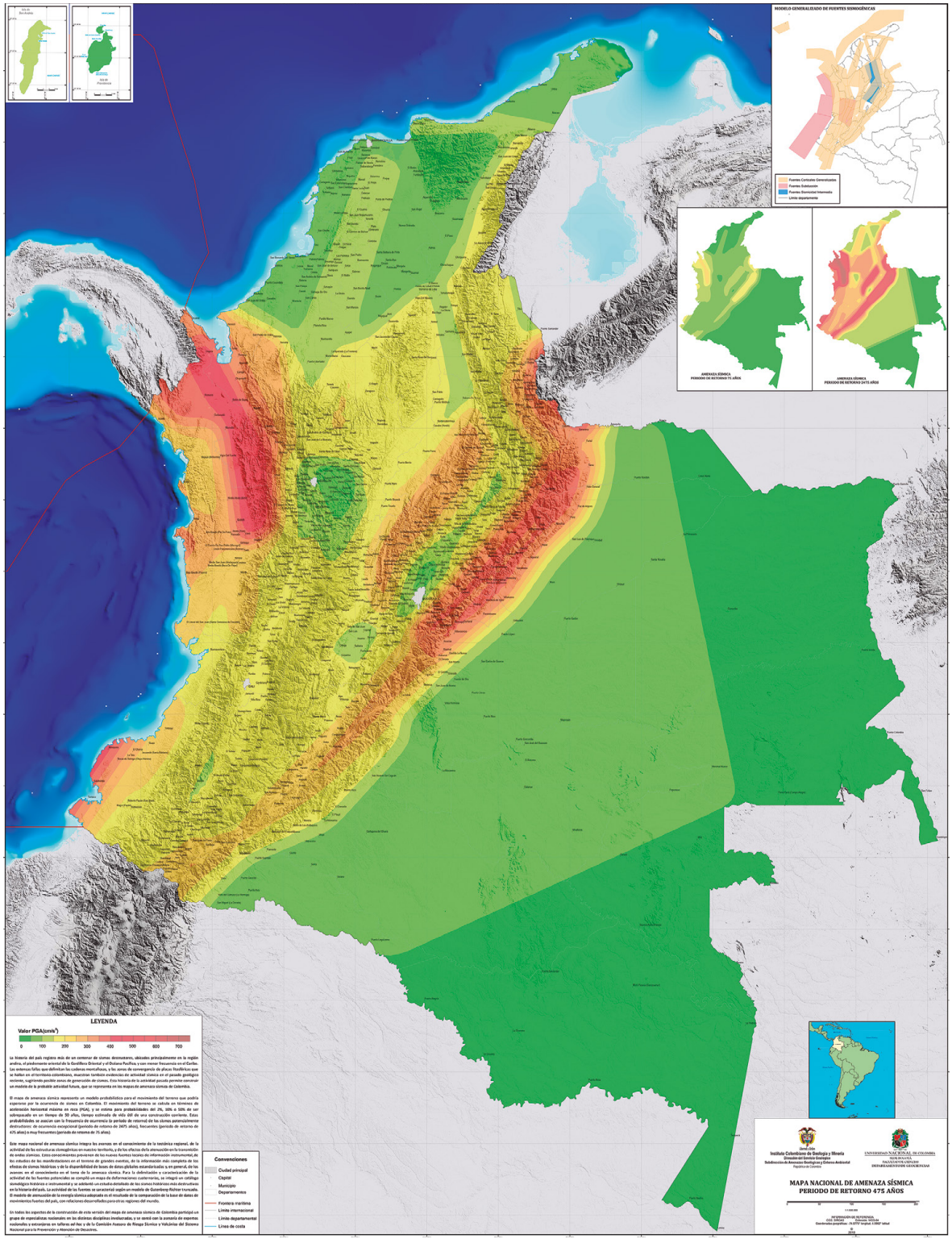



**Figura 5.** Mapa nacional de amenaza sísmica. Periodo de retorno: 475 años
**Fuente:** Ingeominas y Universidad Nacional de Colombia (2010)

Como complemento al análisis probabilista, en el estudio AIS (2009) se llevó a cabo un análisis determinista en el que se evalúo la aceleración máxima utilizando sismos históricos como fuentes sísmicas y las ecuaciones de atenuación de Donovan (1973).

En el estudio AIS (2009) se obtuvieron, para un periodo de retorno de 475 años, aceleraciones espectrales correspondientes a los siguientes periodos de vibración: 0,1, 0,3, 0,5, 1 y 2 segundos. Asimismo, se elaboraron mapas de aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos del terreno para los siguientes periodos de retorno: 31, 225, 475, 1.000 y 2.500 años. Para ambos casos se consideraron las ecuaciones de atenuación de Gallego (2000), así como las de Campbell (1997) y García *et al.* (2005).

La figura 6 presenta aceleraciones máximas estimadas considerando, a) la ecuación de atenuación de Gallego (2000), y b) el modelo de atenuación Campbell (1997) y García *et al.* (2005). Los resultados de ese estudio se encuentran publicados en Salgado *et al.* (2010).

En la figura 6 se observa una distribución similar a la obtenida en los estudios de AIS, Uniandes e Ingeominas y García *et al.* (1984). Las zonas de mayor amenaza se encuentran al norte del departamento de Nariño y de Chocó, así como en el departamento de Norte de Santander y Arauca, en la frontera con Venezuela. En estas zonas, las aceleraciones pico varían entre 0,4 y 0,5 g.

Entre las evaluaciones más recientes de amenaza sísmica se encuentra el modelo generado por Bernal (2014), que incluyó el desarrollo de ecuaciones de atenuación para el país siguiendo un enfoque de espectro de fuente. Estos resultados se usaron en la definición de parámetros de diseño de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 (MinTransporte, 2015), y fueron publicados por Salgado *et al.* (2016).

**(a)** Ecuación de atenuación de Gallego (2000)

**(b)** Modelo de atenuación Campbell (1997) y García *et al.* (2005)

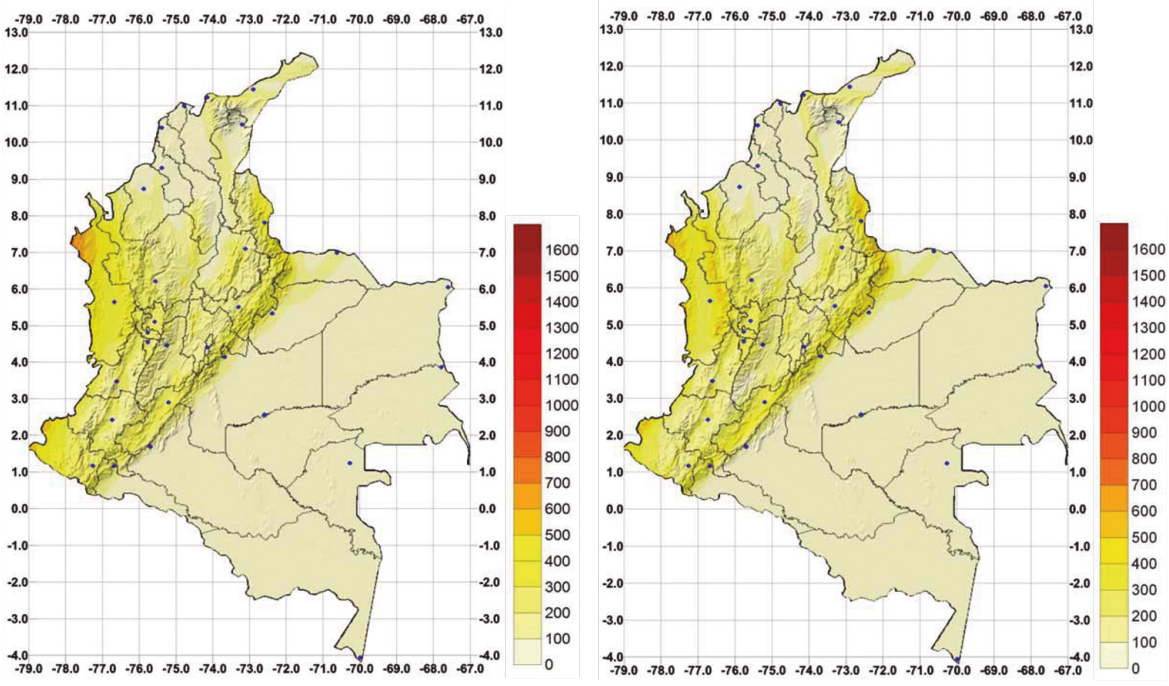



**Figura 6.** Aceleración pico para un periodo de retorno de 475 años. **a)** Ecuación de atenuación de Gallego (2000); **b)** ecuación de atenuación de Campbell (1997) y García *et al.* (2005)
**Fuente:** AIS (2009)

De los antecedentes de la evaluación de la amenaza sísmica en Colombia se destaca la consideración de diferentes alternativas de análisis en el modelo AIS *et al.* (1996), así como la evaluación de ecuaciones de atenuación llevada a cabo en los modelos de Ingeominas y Universidad Nacional de Colombia (2010) y AIS (2009) y en Bernal (2014).

Teniendo en cuenta las anteriores experiencias, el SGC considera que pueden enfocarse mejoras en el entendimiento y modelación de la amenaza sísmica en los siguientes tópicos, entre otros:

- Inclusión de criterios geofísicos, de información geológica, tectónica y del catálogo de eventos sísmicos para una mejor definición de la geometría de las fuentes sísmicas.
- Consideración de modelos de sismicidad suavizada con el fin de reducir la subjetividad en la definición de la geometría de fuentes sísmicas.
- Caracterización de fallas activas para la modelación de fuentes sísmicas superficiales desde un punto de vista tectónico.
- Revisión de la geometría y de los parámetros de sismicidad de las fuentes de subducción.
- Evaluación y selección de ecuaciones de atenuación que mejor representen las intensidades del movimiento observadas según los diferentes ambientes tectónicos.

Considerando los anteriores tópicos, y con el fin de contribuir al conocimiento de la amenaza sísmica del país, el SGC y la Fundación Global Earthquake Model llevaron a cabo un modelo de amenaza sísmica cuyas principales características y resultados se describen en el presente estudio.

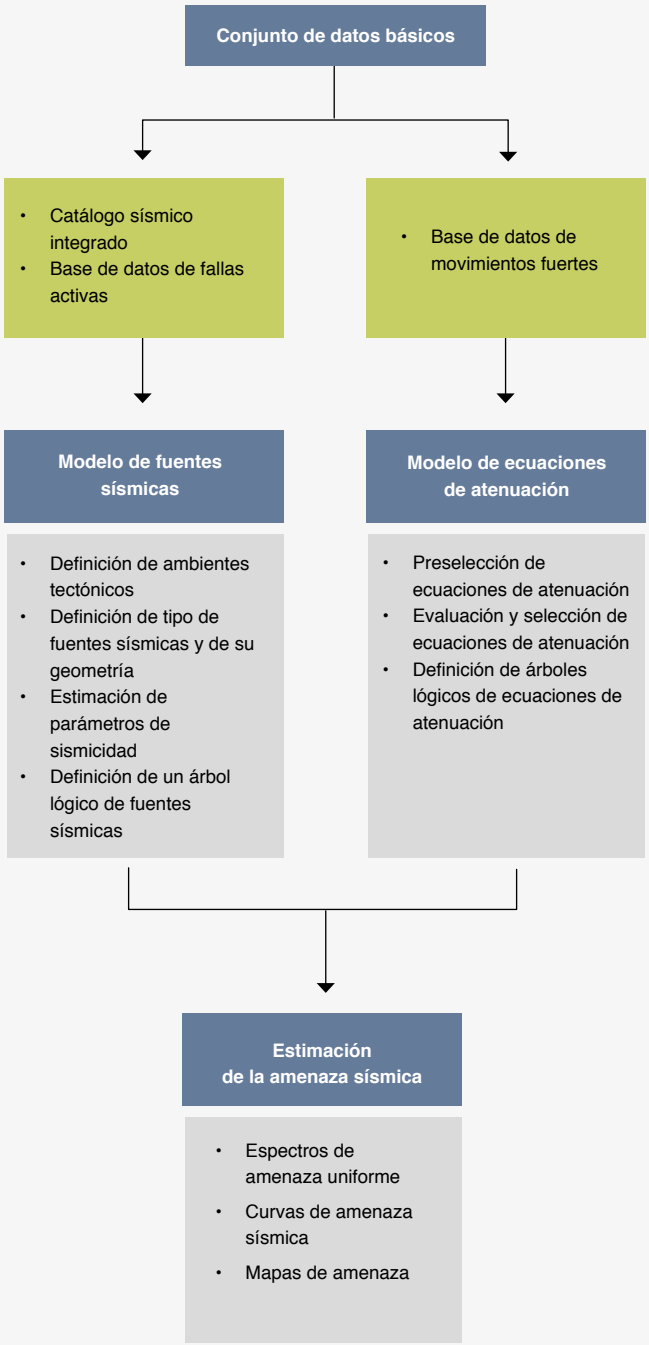



**Figura 7.** Esquema metodológico del modelo de amenaza sísmica

## 1.3 Estructura de la publicación y del modelo de amenaza sísmica

La figura 7 presenta un esquema metodológico del modelo de amenaza sísmica y de la estructura del presente estudio. El capítulo 2 presenta los objetivos y alcances; en el capítulo 3 se describen las fuentes de información y los insumos para la construcción del modelo de amenaza sísmica, que corresponden a la conformación de un catálogo sísmico integrado, una base de datos de fallas activas y una base de datos de movimiento fuerte.

El capítulo 4 se dedica a la definición de las fuentes sísmicas, su caracterización sismotectónica, su distribución geográfica y la definición de relaciones de recurrencia de magnitudes. Al respecto, se realiza una caracterización de la sismicidad según ambientes tectónicos, se describe el tipo de fuentes sísmicas y se estiman sus parámetros de sismicidad a partir de los datos del catálogo sísmico integrado o usando criterios tectónicos.

Se consideran diferentes alternativas para modelar la sismicidad superficial mediante fallas activas, modelos de sismicidad suavizada y modelos de sismicidad equiprobable. A la vez, para modelar la sismicidad interplaca del Pacífico se consideran diferentes fuentes, según las profundidades de los eventos y la segmentación de las fuentes. De modo similar, para la zona de Benioff se consideran diferentes fuentes, según la profundidad de los sismos. Las anteriores alternativas de modelación se resumen en un árbol lógico de fuentes sísmicas.

En el capítulo 5 se detalla el proceso de selección de las ecuaciones de atenuación que se utilizarán para calcular las intensidades del movimiento. Para cada ambiente tectónico se preselecciona un conjunto de ecuaciones que se evalúan según su ajuste con los datos observados, disponibles en la base de datos de movimiento fuerte. Como resultado se define un árbol lógico de ecuaciones según ambiente tectónico.

La metodología de cálculo de la amenaza sísmica se describe en el capítulo 6. Por último, los resultados de la estimación probabilista de la amenaza sísmica nacional se presentan en el capítulo 7.

# 2

# Objetivos y alcance

## 2.1 Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo general elaborar un modelo probabilista de amenaza sísmica para Colombia. Los objetivos específicos son los siguientes:

*Consolidación de datos básicos para el análisis*

- Crear un catálogo integrado de eventos sísmicos, considerando los eventos registrados por la Red Sismológica Nacional, registros de eventos históricos, así como catálogos internacionales.
- Consolidar una base de datos de fallas activas con información relevante para la modelación de la amenaza sísmica.
- Conformar una base de datos de movimiento fuerte a partir de registros de la Red Nacional de Acelerógrafos del SGC.

*Definición de fuentes sísmicas*

- Definir ambientes tectónicos y clasificar la sismicidad según esos ambientes.
- Para cada ambiente tectónico, identificar el tipo de fuentes sísmicas adoptadas para la modelación y establecer los principales supuestos.
- Modelar la sismicidad superficial a partir de modelos alternativos (equiprobable y de sismicidad suavizada). Complementar los análisis con información de fallas activas.
- Proponer una geometría de las fuentes sísmicas asociadas al proceso de subducción del Pacífico, así como a la zona de Benioff y el nido sísmico de Bucaramanga, teniendo en cuenta la distribución geográfica de magnitudes y profundidad de las fuentes.
- Estimar los parámetros de sismicidad de las fuentes identificadas en el estudio.
- Elaborar un árbol lógico de fuentes sísmicas en el que se consideren incertidumbres asociadas a la definición de las fuentes y el estado actual del conocimiento.

*Selección de ecuaciones de atenuación*

- Para cada ambiente tectónico reconocido, preseleccionar un conjunto de ecuaciones de atenuación aplicables para estimar la intensidad del movimiento del terreno, considerando desarrollos recientes, modelos existentes en la bibliografía técnica y criterios objetivos para tal preselección.
- Realizar un proceso de selección cuantitativo de las ecuaciones de atenuación preseleccionadas para identificar las que mejor se ajusten a las intensidades del movimiento observadas.
- Elaborar un árbol lógico de ecuaciones de atenuación correspondiente a cada ambiente tectónico.

*Evaluación de la amenaza sísmica*

- Obtener mapas de aceleraciones espectrales a escala nacional considerando diferentes periodos de vibración y periodos de retorno.
- Estimar curvas de excedencia de intensidades del movimiento, así como espectros de amenaza uniforme correspondientes a una malla de puntos del país.

## 2.2 Alcances y limitaciones

En este estudio de amenaza sísmica se estiman, dado un periodo de exposición, las probabilidades de excedencia de diferentes intensidades del movimiento del terreno. Dichas intensidades se expresan en términos de aceleraciones espectrales, que se calculan a nivel de roca firme, con velocidad de onda de corte promedio en los 30 m superficiales de 760 m/s. En este estudio no se presentan estimaciones de amenaza sísmica considerando efectos de sitio.

A continuación se presentan alcances y limitaciones en términos del área de estudio, los insumos utilizados, la metodología de cálculo y los resultados obtenidos.

**Área de estudio.** La amenaza sísmica se calcula en una malla de puntos que abarca el territorio colombiano. En cada punto se obtienen curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme de los centros poblados del país, de acuerdo con la información cartográfica disponible en el Marco Geoestadístico Nacional del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

**Insumos para el análisis de amenaza sísmica.** Para la elaboración del modelo de amenaza sísmica se utilizaron diversas fuentes de información, tanto para la caracterización de las fuentes sísmicas (dónde ocurren los sismos y cuáles son sus características), como para el cálculo de las intensidades del movimiento, teniendo en cuenta diferentes ecuaciones de atenuación. Descripciones generales de los datos utilizados se presentan a continuación, y en el capítulo 3 se presentan mayores detalles sobre los insumos básicos utilizados para la modelación de la amenaza sísmica.

*Catálogos sísmicos.* Se recopiló información de catálogos sísmicos de diferentes instituciones de orden global y nacional. Los datos utilizados corresponden a los disponibles en septiembre de 2014.

*Base de datos de movimiento fuerte.* Se recopiló y procesó información de la red nacional de acelerógrafos registrada entre junio de 1994 y abril de 2017. También se consideró información registrada por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica de Ecuador respecto al sismo de Pedernales del 16 de abril de 2016 y sus réplicas.

*Información geológica y sismológica.* Para definir fuentes sísmicas corticales se emplearon datos geológicos recientes sobre la definición del límite de Mohorovičić, así como resultados de estudios de la anomalía de Bouguer, espesor de la corteza y gradiente térmico. Se utilizó información del SGC y de instituciones globales sobre mecanismos focales de los sismos y trayectorias de máximos esfuerzos.

*Base de datos de fallas activas.* Se cuenta con una base de datos de fallas activas en la que se incluye información sobre la geometría y las características

geodinámicas de las fallas, útil para caracterizar su sismicidad.

**Metodología de análisis.** Para calcular la amenaza sísmica se adopta una metodología probabilista. Entre los principales supuestos del modelo se encuentra la independencia de los eventos, de tal manera que la ocurrencia de un sismo no afecta las probabilidades de ocurrencia de otro. Bajo este supuesto, la ocurrencia de sismos se modela mediante una distribución de Poisson en la cual se asume que la tasa de ocurrencia de movimientos telúricos es constante en el tiempo. En el presente estudio no se consideran modelos de sismicidad que dependan del tiempo.

Teniendo en cuenta que pueden existir diferentes alternativas para el cálculo de la amenaza según los modelos de sismicidad utilizados, diferentes propuestas de la geometría de las fuentes sísmicas y diferentes ecuaciones de atenuación aplicables, se elaboró un árbol lógico en el que se definen múltiples casos de análisis y se les asignan distintos pesos, según el criterio de los autores.

**Uso de los resultados.** Los resultados del presente estudio corresponden a mapas de amenaza, curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme en roca firme, y pueden ser utilizados como referencia para actividades de conocimiento y reducción del riesgo sísmico, así como para fortalecer la capacidad de respuesta ante desastres de escalas nacional y regional, en términos de factibilidad.

Los resultados del presente estudio en ningún caso reemplazan los coeficientes sísmicos de diseño establecidos en algún reglamento de diseño sismorresistente, o bien los resultados de estudios específicos llevados a cabo sobre obras de infraestructura.

El Modelo Nacional de Amenaza Sísmica fue concebido, principalmente, para la estimación de intensidades sísmicas a nivel de roca firme; sin embargo, a juicio del usuario, el modelo podrá utilizarse en la estimación de intensidades sísmicas en superficie a partir de dos enfoques:

**a.** Mediante la propagación de la amenaza en roca, a superficie, a través de funciones de transferencia obtenidas del análisis de la respuesta dinámica de los depósitos de suelo en el sitio bajo estudio. Este enfoque deberá emplearse en estudios de microzonificación sísmica, y en estudios particulares de sitio.

**b.** Mediante la adopción/asignación de perfiles de velocidad de onda de corte (Vs) para los sitios de análisis, y su evaluación directa en las ecuaciones de atenuación que conforman el modelo de movimiento fuerte del modelo. Se aclara que las ecuaciones de atenuación deberán usarse únicamente en el rango de valores de Vs para el cual fueron calibradas, y el usuario será responsable de revisar dichos rangos en la literatura correspondiente citada en este documento. Claramente, este enfoque deberá emplearse en estudios regionales y/o locales de amenaza sísmica, para los cuales la escala de análisis e incertidumbre en la estimación de intensidades sísmicas en superficie sea aceptable.

Para la ejecución del segundo enfoque se requerirán modelos (perfiles) detallados de Vs, como el modelo nacional (Eraso y Montejo, 2019), desarrollado a escala 1:3.000.000, por ejemplo.

# 3

# Conjunto de datos básicos

En Colombia, la información existente sobre sismos es de variada índole. Por un lado, se cuenta con datos de carácter histórico y geográfico, a partir de los cuales se infiere la localización y severidad de terremotos ocurridos en épocas en que no se contaba con instrumentos para su registro. Por otro lado, existen bases de datos provenientes de redes instrumentales, a través de las cuales se obtienen parámetros objetivos que describen los sismos.

Por otra parte, en el país existe información derivada de la observación geológica, mediante la cual es posible localizar fallas, describir su geometría y estimar su actividad sísmica. A partir de la compilación y los análisis de los datos existentes es recomendable elaborar modelos y estimaciones que permitan a la comunidad en general estar al tanto de la amenaza sísmica a la que está expuesta. Tales actividades hacen parte de las funciones del Servicio Geológico Colombiano relacionadas con la integración de conocimientos, compilación de información y evaluación de amenazas geológicas.

A partir del conocimiento actual del SGC no es posible determinar con exactitud dónde y cuándo se presentarán sismos, ni las intensidades del movimiento que éstos generarán en el territorio. Dada esta limitación, en el presente estudio se adopta una metodología probabilista mediante la cual es posible obtener, entre otros resultados, el valor promedio y rangos de variación de las intensidades del movimiento para correspondientes a determinados periodos de retorno.

En este capítulo se presenta el conjunto de datos básicos que respaldan el modelo y las estimaciones de amenaza sísmica obtenidas para Colombia. Por un lado, se describe la elaboración de un catálogo sísmico integrado que corresponde a la compilación y el análisis de información de sismos que se han presentado en la zona de estudio, en términos de su localización, magnitud y profundidad, entre otras características. Entre los objetivos

de dicho catálogo se encuentra la obtención de una adecuada cobertura espacial y temporal de eventos sísmicos, de tal manera que se tenga información suficiente para definir la geometría de las fuentes sísmicas y para caracterizar su tasa de actividad.

Como complemento a la definición de fuentes sísmicas, en este capítulo se presenta una base de datos de fallas activas que corresponde a la caracterización sistemática de la geometría y las características geodinámicas de fallas activas identificadas en Colombia.

Por otro lado, se describe la información disponible en los registros acelerográficos de sismos ocurridos en la zona de estudio, así como los procedimientos de procesamiento aplicados a dichos registros. Esta información permite conocer las intensidades de tales eventos en diferentes puntos de observación. A partir de estos datos es posible realizar simplificaciones para calcular de manera aproximada las aceleraciones esperadas en un sitio analizado, debido a la ocurrencia de un sismo de ciertas características, situado a una distancia determinada.

## 3.1 Catálogo Sísmico Integrado

El SGC elaboró el Catálogo Sísmico Integrado (CSI) a partir de la compilación y revisión de información de sismos registrados en diferentes catálogos globales y nacionales. Para elaborar el CSI se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Priorización e integración de catálogos, actividad que corresponde a la selección de la información más confiable de cada catálogo y la remoción de soluciones (eventos) duplicadas.
- Homogeneización del tipo de magnitud a momento sísmico (Mw), que incluye información de estudios de sismicidad histórica desarrollados por el SGC.
- Remoción de eventos dependientes.
- Análisis de completitud.

En las siguientes secciones se presentan los catálogos sísmicos utilizados, los procedimientos de integración y homogeneización de datos, así como los principales resultados del CSI.

### 3.1.1 Catálogos sísmicos utilizados

Para la construcción del CSI se utilizaron catálogos de agencias globales y nacionales. Los catálogos globales consultados fueron los siguientes:

- *EHB*: Engdahl, van der Hilst and Buland catalogue (ISC, 2012; Engdahl *et al.*, 1998)
- *ISC-GEM*: International Seismological Centre-Global Earthquake Model (Di Giacomo *et al.*, 2014; Storchak *et al.*, 2013)
- *ISC*: International Seismological Centre (ISC) (Bondár y Storchak, 2011)
- Centennial (Engdahl y Villaseñor, 2002)
- *ANNS Composite (ANSS)* (NCEDC, 2013)
- *NEIC*-ANSS Comprehensive (USGS, 2014)
- *GCMT*: Global Centroid Moment Tensor Catalog (GCMT) (Dziewonski *et al.*, 1981; Ekström *et al.*, 2012; Storchak *et al.* 2013)
- *IDC* International Data Center (IDC) (ISC, 2015)

Los catálogos nacionales utilizados fueron los siguientes:

- *SGC*: Servicio Geológico Colombiano (Colombia)
- *IGEPN*: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica (Ecuador) (Beauval *et al.*, 2013)
- *CASC*: Centro Sismológico de América Central (Alvarenga *et al.*, 1998)
- *Funvisis*: Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (Venezuela)
- *Ineter*: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (Ineter, 2016)

La tabla 2 resume las principales características de cada uno de los catálogos consultados. Se aclara que el número de eventos de cada catálogo corresponde al número de sismos considerados en el desarrollo del CSI del modelo nacional de amenaza sísmica de Colombia. En el anexo A se presenta una breve descripción de los catálogos consultados.

**Tabla 2.** Características generales de la información usada de los catálogos globales y locales en la construcción del catálogo integrado

| Catálogo | Periodo | | Tipo de magnitud | N.º de eventos |
|---|---|---|---|---|
| | Desde | Hasta | | |
| EHB | 1906 | 2009 | mb<br>Ms | 2.140 |
| ISC-GEM | 1906 | 2012 | Mw | 664 |
| ISC | 1904 | 2012 | Ms<br>mb | 19.217 |
| Centennial | 1901 | 1959 | Mw<br>mB<br>Ms<br>Unk | 57 |
| ANNS | 1930 | 1972 | mb<br>Ms<br>Unk | 1.790 |
| NEIC | 1973 | 2014 | Mw<br>Ms<br>mb<br>me | 8.320 |
| GCMT | 1976 | 2014 | Mo | 703 |
| IDC | 2013 | 2014 | mb | 290 |
| SGC | 1993 | 2014 | ML<br>Mw | 23.336 |
| IGEPN | 1994 | 2009 | Md | 3.899 |
| CASC | 1992 | 2013 | mb<br>md<br>MW | 751 |
| Funvisis | 2008 | 2009 | Md | 647 |
| Ineter | 2008 | 2013 | Mw | 7 |

**Nota.** Tipos de magnitudes consideradas: magnitud de ondas de cuerpo-periodo corto (mb); magnitud de ondas de cuerpo-banda ancha (mB); magnitud de ondas superficiales (Ms); magnitud de energía (me) Mo: momento sísmico escalar; magnitud local (ML); magnitud momento (Mw); magnitud de duración (Md); desconocida (Unk).

### 3.1.2 Priorización e integración de los catálogos seleccionados

El principal objetivo de la integración de catálogos es obtener una base de datos de sismos homogénea, en la cual se encuentre una única descripción de cada evento. El proceso de comparación y unificación de catálogos intenta resolver las siguientes particularidades:

- *Periodos de información*. El periodo de información reportada por una agencia, o contenido en un catálogo, no es el mismo en todos.
- *Calidad de la información y variación temporal de la cobertura*. La cobertura de la red de estaciones de las agencias en la zona de análisis no es la misma y varía con el tiempo. Adicionalmente, la calidad de la información varía entre catálogos dependiendo de la cobertura de la red de estaciones y del tipo de procedimiento utilizado para analizar la información registrada.
- *Procesamiento y compilación de datos de los catálogos seleccionados*. Para la unificación de catálogos es necesario distinguir entre datos generados directamente por una agencia y datos generados a partir de compilación de información de varias fuentes. También es posible que los datos de un mismo sismo provengan de diferentes catálogos. Por ejemplo, la información de la solución hipocentral puede provenir de una agencia, mientras que los datos de su magnitud pueden provenir de otra.

Para abordar estos puntos se estableció un conjunto de criterios de priorización que facilita la integración de la información de los catálogos sísmicos. Tales criterios permiten elegir qué información de un catálogo se prefiere a la de otro, en caso de que dos o más catálogos ofrezcan una solución sobre un mismo evento. En las siguientes secciones se describen los criterios de priorización adoptados.

#### 3.1.2.1 Criterios generales de priorización

De la tabla 3 a la 5 se presentan los criterios adoptados para priorizar la calidad de la información registrada en los catálogos utilizados, en cuanto a localización, magnitud y tipo de magnitud. En estas tablas, la prioridad expresa el orden en que deben escogerse los catálogos (cuanto menor sea el valor, mayor será la prioridad).

**Tabla 3.** Criterios de priorización para la localización de los sismos

| Prioridad | Descripción |
|---|---|
| 1 | La agencia/catálogo reporta su propia localización/relocalización con metodologías mejoradas, para todo el periodo del catálogo integrado. |
| 2 | La agencia/catálogo reporta su propia localización/relocalización con metodologías mejoradas, para un periodo específico del catálogo. |
| 3 | La agencia/catálogo reporta localizaciones de otras agencias con metodologías reconocidas. |

**Tabla 4.** Criterios de priorización para la magnitud de los sismos

| Prioridad | Descripción |
|---|---|
| 1 | La agencia reporta su propio cálculo/recálculo con metodologías conocidas para todo el periodo del catálogo integrado. |
| 2 | La agencia reporta un recálculo de magnitud con metodologías conocidas para todo el periodo del catálogo integrado. |
| 3 | La agencia reporta una aproximación de la magnitud con un proxy reconocido para todo el periodo del catálogo integrado. |
| 4 | Que se cumplan las anteriores, para periodos específicos del catálogo. |
| 5 | La agencia reporta magnitudes de otras agencias con metodologías reconocidas. |

**Tabla 5.** Criterios de priorización según el tipo de magnitud

| Prioridad | Descripción |
|---|---|
| 1 | Magnitud de momento (Mw) |
| 2 | Magnitud de ondas de superficie (Ms y MS) |
| 3 | Magnitud de ondas de cuerpo (mb) |
| 4 | Magnitud local (ML) |
| 5 | Otras, de las cuales se conozca un proxy reconocido para Mw |

#### 3.1.2.2 Matrices de priorización

A partir de los anteriores criterios se definieron matrices de priorización para localización, considerando diferentes periodos y rangos de magnitudes para cada una de las agencias o catálogos seleccionados.

En la tabla 6 se presenta la matriz de priorización para localización. Al respecto, se señala que las agencias IGEPN, CASC y SGC únicamente aportan al catálogo a partir de los años noventa. Por su parte, el aporte del catálogo IDC se aprecia desde comienzos de los años dos mil. Cada uno de los periodos corresponde a un hito o hecho histórico que afecta la capacidad de registro y análisis de la información sísmica.

**Tabla 6.** Matriz de prioridad para localización correspondiente a cada uno de los catálogos seleccionados

| Fuente | Prioridad |
|---|---|
| SGCi | 1 |
| ISC-GEM | 2 |
| EHB | 3 |
| CENT | 4 |
| ISC-REV | 5 |
| IDC | 6 |
| GUTE | 7 |
| NEIC | 8 |
| ISC | 9 |
| IGEPN | 10 |
| CASC | 11 |
| SGCo | 12 |

**Nota:** El catálogo SGCi corresponde a eventos ubicados al interior de la zona de confiabilidad definida según parámetros de error en la localización en latitud, longitud y profundidad, además de los límites de los ángulos de mayores aberturas azimutales entre estaciones (GAP). Por su parte, el catálogo SGCo corresponde a eventos ubicados fuera de la zona de confiabilidad. Detalles sobre estos catálogos se encuentran en el anexo A.

La tabla 7 presenta la matriz de priorización por magnitud correspondiente a cada uno de los catálogos seleccionados, de acuerdo con los criterios adoptados. Las matrices presentadas en las tablas 6 y 7 permiten identificar y seleccionar una solución preferida en los casos en que exista más de una solución para un mismo evento. A partir de estas matrices es posible identificar y remover eventos repetidos de catálogos o fuentes de información de menor prioridad.

Además de las matrices de prioridad, se señala que para la construcción del CSI se dio prelación a las soluciones de los eventos sísmicos provenientes del catálogo de sismos históricos del SGC (SGC-H), que contiene soluciones revisadas de sismos desde el año 1 644.

La tabla 8 y la figura 8 presentan el número de eventos aportados según agencia y los criterios de localización y magnitud. En esa figura se puede observar que la mayor cantidad de soluciones utilizadas son tomadas del SGC, seguidas por las del ISC-REV, mientras que las agencias que menos aportan son CENT y GUTE.

**Tabla 7.** Matriz de priorización por magnitud correspondiente a cada uno de los catálogos seleccionados

| Catálogo | Mw | me | MS | Ms | Ms | mb | mB | Mb | ML | Md |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GCMT | 1 | | | | | | | | | |
| ISC-GEM | 2 | | | | | | | | | |
| CENT | 3 | | | 7 | | | 15 | | | |
| NEIC | 4 | 5 | | 11 | 10 | 17 | | 18 | | |
| ISC-REV | | | 6 | | | 13 | | | | |
| PAS | | | 8 | | | | | | | |
| EHB | | | | 9 | | | | 16 | | |
| SGCi | 12 | | | | | | | | 19 | |
| IDC | | | | | | 14 | | | | |
| IGEPN | | | | | | | | | | 20 |
| CASC | 21 | | | | | 22 | | | | |
| SGCo | 23 | | | | | | | | 24 | |

**Tabla 8.** Número de eventos aportados por agencia luego de la priorización

| Agencia | | N.º localización | N.º magnitud |
|---|---|---|---|
| CASC | | 446 | 455 |
| CENT | | 3 | 9 |
| EHB | | 1.411 | 27 |
| GCMT | | 0 | 701 |
| IDC | | 205 | 179 |
| IGEPN | | 3.113 | 3.635 |
| ISC-GEM | | 532 | 297 |
| ISC-REV | | 5.693 | 7.532 |
| NEIC | | 391 | 691 |
| PAS | | 0 | 25 |
| SGC | SGC-H | 40 | 40 |
| | SGCi | 19.376 | 19.376 |
| | SGCo | 1.714 | 1.714 |
| GUTE | | 25 | 0 |

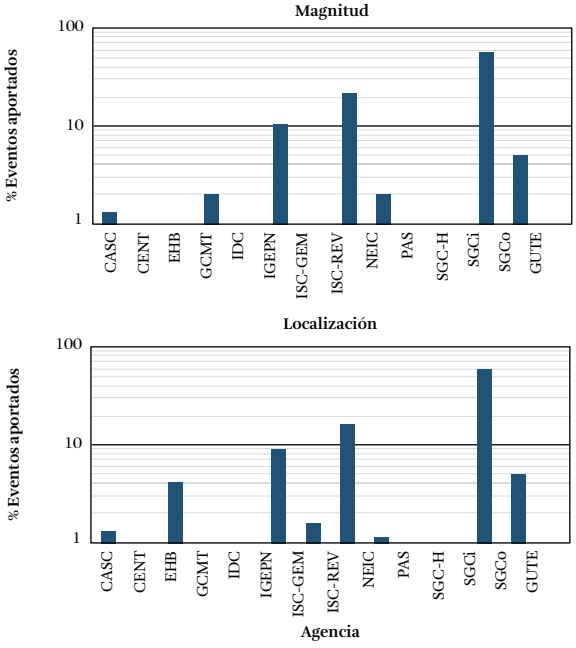



**Figura 8.** Participación de las agencias en términos de magnitud y localización de los eventos

La figura 8 presenta las soluciones preferidas de acuerdo con los criterios de priorización adoptados para la selección de la localización. En esta figura se observa la relevancia de los catálogos ISC-REV, ISC-GEM, EHB y NEIC en términos de número de eventos. Asimismo, se destacan los aportes de los catálogos ISC-GEM, GUTE y SGC en cuanto a la magnitud de los sismos.

En la figura 9 se puede observar la importancia de los catálogos ISC-REV y EHB para modelar la sismicidad en el Pacífico colombiano y en el nido sísmico de Bucaramanga. A la vez, se considera que el catálogo SGCi puede tener mayor influencia en la definición de la sismicidad cortical.

Sobre los resultados de la figura 9 vale la pena resaltar que el catálogo GCMT es una fuente prioritaria para la definición de la magnitud Mw de los sismos. No obstante, este catálogo no se incluye dentro de las prioridades presentadas en la tabla 6 para establecer la ubicación de los eventos. Por esta razón, en la figura 9 no se encuentran eventos localizados según el catálogo GCMT.

En cuanto a la distribución geográfica de los sismos, en la figura 10 se puede observar la contribución de catálogos de tipo regional y local fuera de Colombia, tales como los catálogos de CASC y de IGEPN.

La figura 11 presenta la distribución geográfica de los sismos aportados por el SGC (en términos de localización). En esta figura se puede observar que el mayor número de eventos corresponden al catálogo SGCi, seguido del SGCo y finalmente del SGC-H. Sin embargo, cabe resaltar la importancia del aporte de los sismos históricos debido a que todos los eventos tienen valores de Mw mayores de 5.

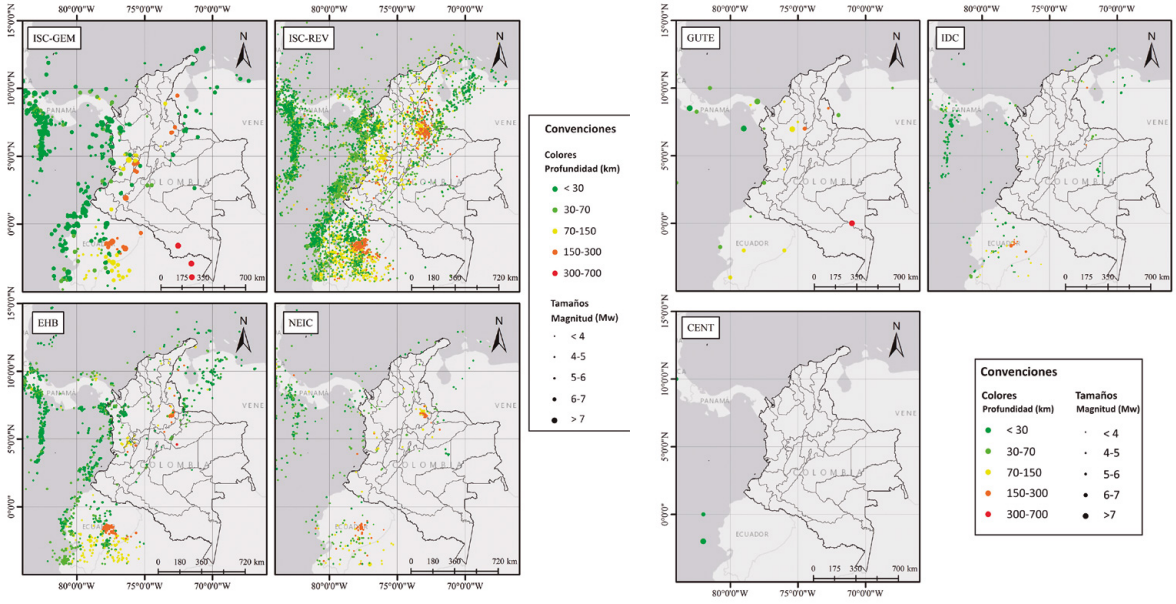



**Figura 9.** Soluciones preferidas de los catálogos consultados

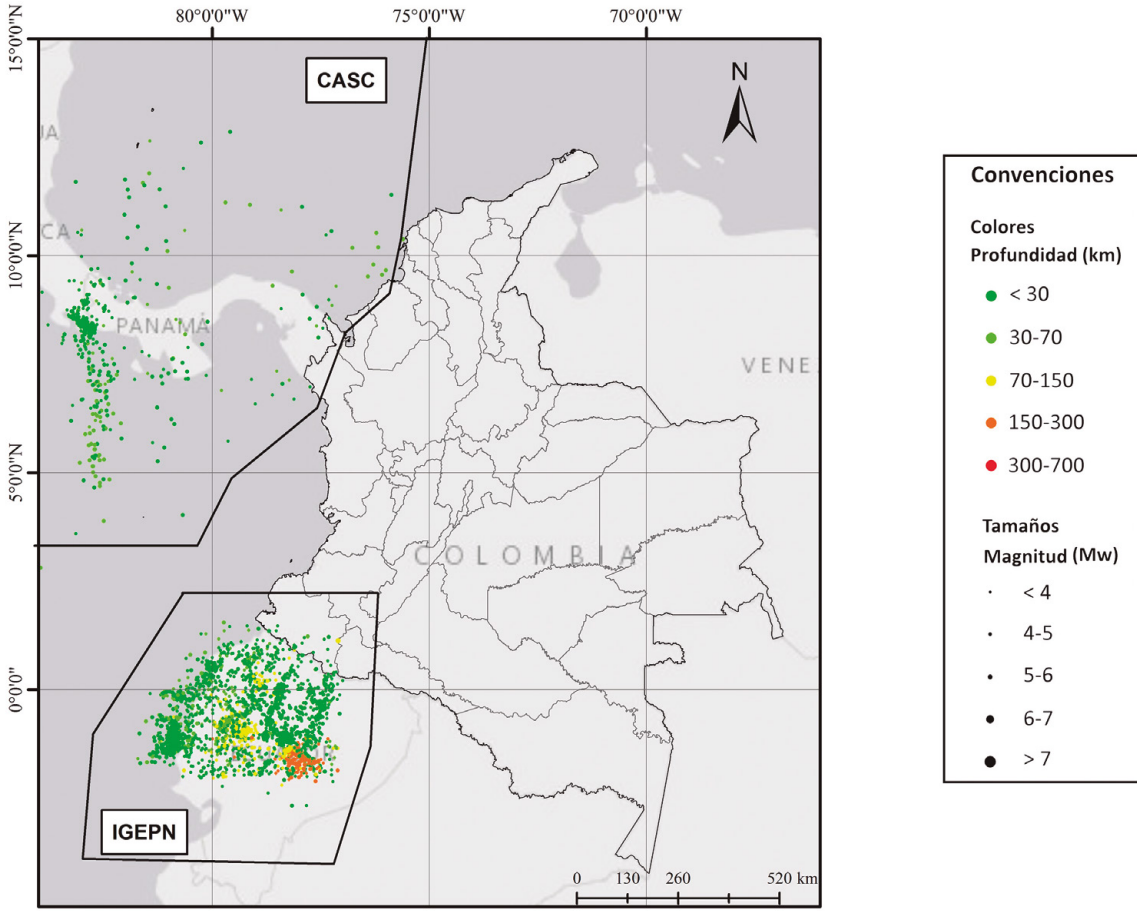



**Figura 10.** Soluciones preferidas de los catálogos regionales consultados

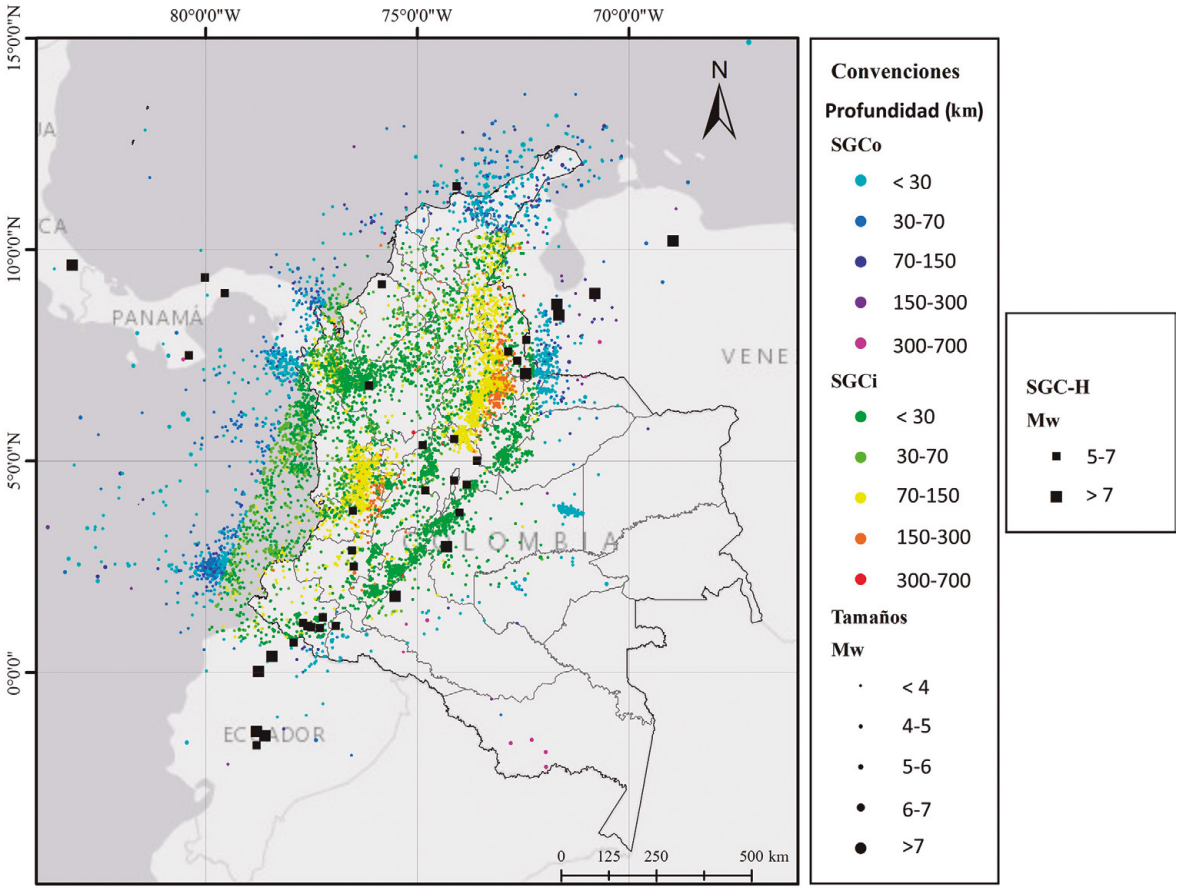



**Figura 11.** Soluciones preferidas del catálogo del Servicio Geológico Colombiano

### 3.1.3 Homogeneización de magnitudes

Los diferentes tipos de magnitudes reportadas por los catálogos seleccionados fueron homogeneizados a Mw. Esta homogeneización obedece principalmente a que las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPE, por sus siglas en inglés) usadas para la estimación de la amenaza sísmica están en función de Mw. Además, la magnitud de momento refleja más adecuadamente las características de la fuente sísmica y es más estable en un rango de valores de magnitud más amplio.

Se plantearon diferentes alternativas de relaciones globales desarrolladas por varios autores, relacionando Mw con otro tipo de magnitud, como las presentadas en Di Giacomo *et al.* (2014), Bondár y Storchak (2011) y Bormann *et al.* (2009), entre otros.

Sin embargo, estas relaciones presentan una gran variación en los parámetros obtenidos. Tal variación se debe, entre otros factores, al tipo de relación calculada, al número de eventos, la fuente de información usada y el rango de validez de las mismas. De esta manera, es posible obtener una marcada sub o sobrestimación de magnitudes, según el caso.

Con el fin de evitar la subjetividad en la selección de una u otra relación entre magnitudes, o bien el uso de diferentes relaciones de una misma magnitud, se calcularon relaciones usando valores de Mw estimados a partir de Mo (reportado por el GCMT por medio del tensor de momento). También se consideraron los valores de mb y Ms estimados por el NEIC y presentados por el GCMT, correspondientes a los mismos eventos que cuentan con magnitud Mw.

Debido a la distribución de los datos, se usaron relaciones exponenciales y bilineales (Scordillis, 2006) que presentan un ajuste adecuado. Se utilizó información de sismos ocurridos entre 1976 y 2015, para un total de 37.849 eventos para mb y 21.070 eventos para Ms.

Finalmente, las relaciones bilineales fueron preferidas a las exponenciales debido a su mejor ajuste a la población de datos, especialmente en magnitudes mayores de 6.

A continuación se presentan las relaciones desarrolladas para Mw-mb, Mw-Ms y Ms-Mw.

En el catálogo del IGEPN se usó la relación entre Mw y Md desarrollada por sus autores (Beauval *et al.*, 2013). Teniendo en cuenta los criterios y matrices de priorización adoptados según magnitudes, no se consideró necesario utilizar relaciones con otro tipo de magnitudes.

### 3.1.3.1 Relación entre Mw (GCMT) y mb (NEIC-GCMT)

La tabla 9 presenta los parámetros obtenidos en el cálculo de magnitudes Mw a partir de magnitudes mb. En la figura 12 se presentan los datos observados y las relaciones obtenidas.

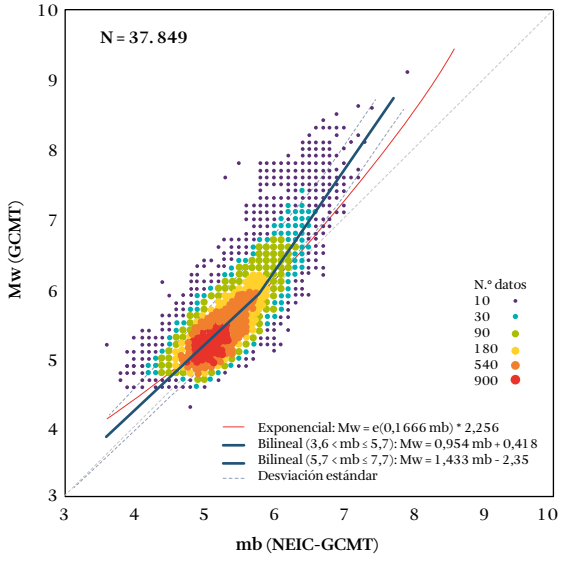



**Figura 12.** Relación entre magnitudes Mw (GCMT) y mb (NEIC-GCMT) en 37.849 eventos

**Tabla 9.** Relaciones obtenidas entre magnitud Mw (GCMT) y mb (NEIC-GCMT)

| Relación | rms | $R^2$ | σ |
|---|---|---|---|
| **Mw** (3,6 < mb ≤ 5,7) **= 0,954 mb + 0,42** | 0,08 | 0,64 | 0,28 |
| **Mw** (5,7 < mb ≤ 7,7) **= 1,433 mb –2,35** | 0,13 | 0,5 | 0,36 |

### 3.1.3.2 Relación entre Mw (GCMT) y Ms (NEIC-GCMT)

La tabla 10 presenta los parámetros obtenidos para el cálculo de magnitudes Mw a partir de magnitudes Ms. En la figura 13 se presentan los datos observados y las relaciones obtenidas.

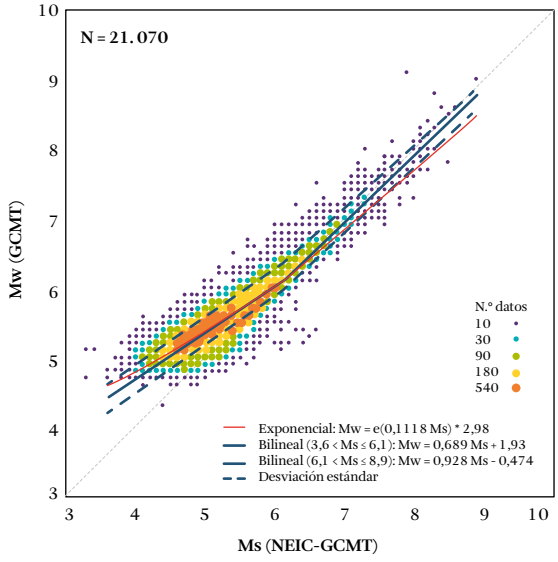



**Figura 13.** Relación entre magnitudes Mw (GCMT) y Ms (NEIC-GCMT) en 21.070 eventos

**Tabla 10.** Relaciones obtenidas entre magnitudes Mw (GCMT) y ms (NEIC-GCMT)

| Relación | rms | $R^2$ | σ |
|---|---|---|---|
| **Mw** (3,6 < Ms ≤ 6,1) **= 0,689 Ms + 1,93** | 0,04 | 0,83 | 0,20 |
| **Mw** (6,1 < Ms ≤ 8,9) **= 0,928 Ms + 0,474** | 0,03 | 0,84 | 0,18 |

### 3.1.3.3 Relación entre Mw (GCMT) y ML (SGC)

En el presente estudio se considera que no existe información suficiente para una establecer una relación estadísticamente robusta entre eventos reportados con Mw por agencias globales y magnitudes ML calculadas por el SGC. Dada esta limitación, se llevó a cabo la siguiente aproximación: se estimó primero una relación entre mb (ISC) y ML (SGC); posteriormente se usó la relación esti-

mada entre mb y Mw. Detalles de la relación obtenida se encuentran en la tabla 11 y en la figura 14.

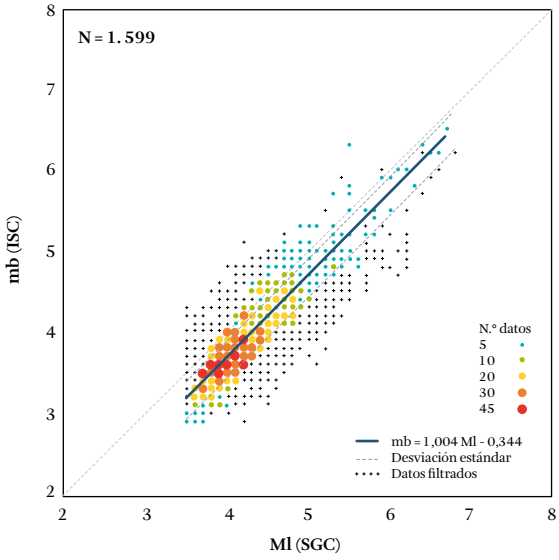



**Figura 14.** Relación entre mb (ISC) y ML (SGC) en 1.599 eventos

**Tabla 11.** Relaciones entre magnitudes Mb (ISC) y ML (SGC)

| Relación | rms | $R^2$ | σ |
|---|---|---|---|
| **$mb[ML_{SGC}]$** (2,9 < Ml ≤ 6,1) **= 1,0044 ML – 0,344** | 0,05 | 0,81 | 0,22 |

Reemplazando estos resultados en la relación obtenida entre Mw y mb (véase la tabla 9), en el rango válido de datos del SGC, se obtiene la siguiente relación:

$$\mathbf{Mw}\ (2{,}9 < ML \leq 6{,}1) = \mathbf{0{,}958\ ML + 0{,}1}\ (\sigma = 0{,}50)$$

### 3.1.3.4 Relación entre Mw (GCMT) y Md (IGEPN)

La siguiente expresión corresponde a la relación entre magnitudes Mw (GCMT) y Md (IGEPN). Esta relación es válida en todo el rango de valores de magnitudes contenidas en el catálogo del IGEPN, desarrollado por Beauval *et al.* (2013).

$$\mathbf{Mw = 0{,}93\ (MD, Md, D) + 0{,}6}\ (\sigma = 0{,}3)$$

### 3.1.4 Características del CSI

El Catálogo Sísmico Integrado (CSI) resulta de la identificación de una solución preferida para cada evento, de acuerdo con las matrices de priorización definidas para los catálogos sísmicos utilizados, así como de la homogeneización de magnitudes a la magnitud Mw. La tabla 12 presenta características generales del CSI. La figura 15 presenta la distribución epicentral de los eventos, que cubren el área geográfica de interés relativa a la amenaza sísmica en Colombia, comprendida entre las coordenadas –84,0° y –66,8° de longitud, y –4,8° y 14,9° de latitud.

**Tabla 12.** Características generales del CSI

| Característica | Descripción |
|---|---|
| Número de eventos | 34.681 |
| Periodo (años) | 1610-2014 |
| Tipo de magnitud | Mw (homogeneizada) |
| Rango de magnitud | 2,9-8,4 |
| Rango de sigma Mw | 0,0-1,18 |
| Rango de profundidad (km) | 0,0-700 |
| Rango de valores de GAP (°) | 0,0-360 (no disponible en algunas agencias) |
| Rango de número de estaciones | 0-1.371 (no disponible en algunas agencias) |
| Rango de valor del RMS* | 0-66,5 (no disponible en algunas agencias) |

*GAP: ángulo máximo entre las líneas de conexión entre el epicentro del sismo y las estaciones de la red.
* RMS: Error cuadrático medio de los tiempos de viaje entre estaciones.

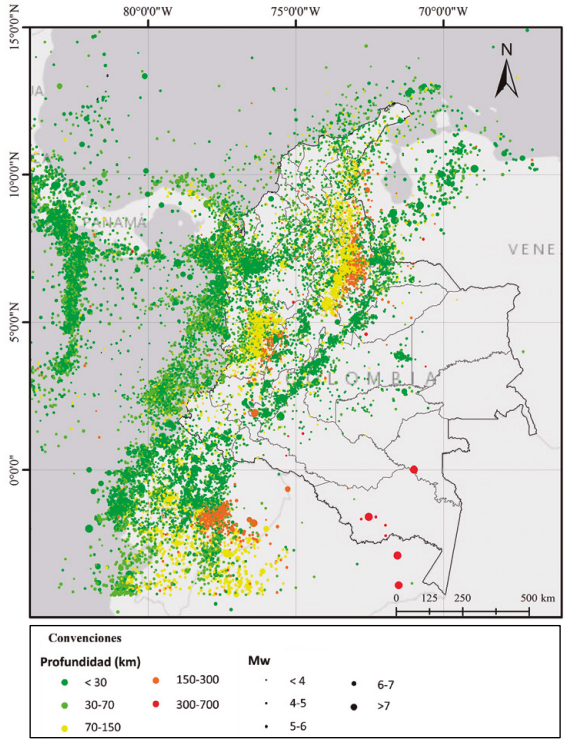



**Figura 15.** Mapa de distribución de hipocentros contenidos en el CSI. Periodo comprendido entre los años 1610 y 2014

### 3.1.5 Remoción de eventos dependientes del Catálogo Sísmico Integrado

Para la modelación de la amenaza se supone que los sismos son eventos aleatorios independientes. Bajo este supuesto, la ocurrencia de un sismo no afecta la de otro, siendo así constante la tasa de ocurrencia de eventos (tal tasa no varía ni depende del tiempo).

Para modelar un proceso estocástico en el que la tasa de ocurrencia de eventos es constante, es posible utilizar una distribución de probabilidad de Poisson. Para estimar dicha tasa de sismicidad es necesario identificar los eventos dependientes (tales como premonitores, réplicas y enjambres) y aislarlos de los eventos principales o independientes. A este proceso de remover eventos dependientes que forman agrupaciones o *clusters*, y que están relacionados en el tiempo y en el espacio, se lo conoce como *declustering*.

Existen diversos algoritmos para identificar eventos dependientes y remover los dependientes, entre los que se destacan los desarrollados por Gardner y Knopoff (1974); Reasemberg (1985); Afteran (Musson, 1999); Zhuang *et al.* (2002); Hainzl *et al.* (2006), entre otros.

En el presente estudio se usó el algoritmo de Gardner y Knopoff implementado en la herramienta Hazard Modeller's Toolkit (HMTK) del motor de cálculo OpenQuake (Weatherill, 2014). Dicho algoritmo permite la identificación de eventos principales y la remoción de eventos dependientes a partir de la definición de una ventana espacio-temporal capaz de discriminar los premonitores y las réplicas a partir de la magnitud de los eventos principales y su relación geográfica y espacial con eventos de magnitud inferior.

Así, un evento se considera dependiente si ha ocurrido a cierta distancia y en un intervalo de tiempo del evento principal, y su magnitud es inferior a la del evento principal. Para definir estas ventanas existen diversas metodologías, tales como las descritas en Gardner y Knopoff (1974) y las aproximaciones propuestas posteriormente por Uhrhammer (1986) y Grüenthal (véase Van Stiphout *et al.*, 2012). La figura 16 presenta las ventanas disponibles en la herramienta HMTK.

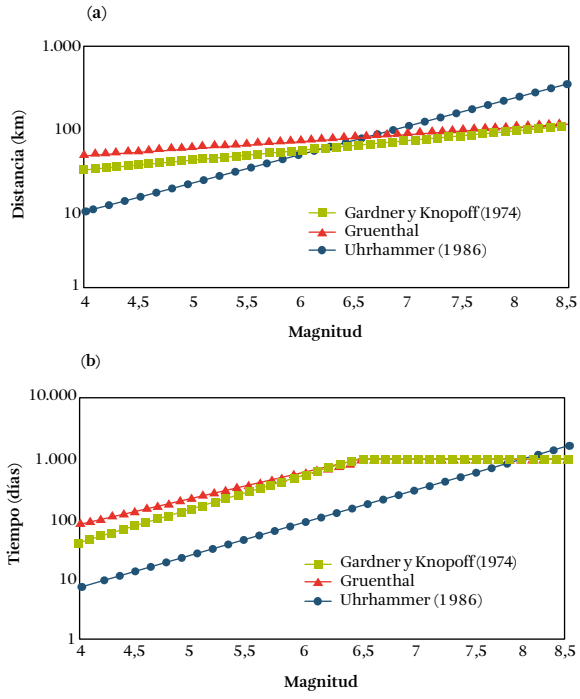



**Figura 16.** Ventanas espacio-temporales implementadas en la herramienta HMTK para remover eventos dependientes siguiendo el método propuesto por Gardner y Knopoff (1974)

La ventana temporal utilizada para identificar eventos premonitores se definió como una fracción proporcional a la ventana de las réplicas. Ventanas iguales tienen un factor igual a 1. En ventanas de tiempo menores o mayores este parámetro se debe reducir o incrementar, respectivamente. Para el *declustering* del CSI se utilizó un factor de 0,9.

El proceso de *declustering* fue realizado según el ambiente tectónico predominante[1], teniendo en cuenta que la ocurrencia de sismos principales y dependientes no es exclusiva de un ambiente tectónico específico. Por ejemplo, eventos en la zona interplaca de la subducción del Pacífico pueden causar réplicas en la zona cortical.

Por esta razón, los eventos se separaron en dos grupos: a) corticales y de interplaca, y b) intraplaca de profundidad intermedia. Los eventos principales identificados en estos grupos fueron posteriormente

1 Una descripción de los ambientes tectónicos considerados en el modelo de amenaza sísmica de Colombia se encuentra en el capítulo 4.

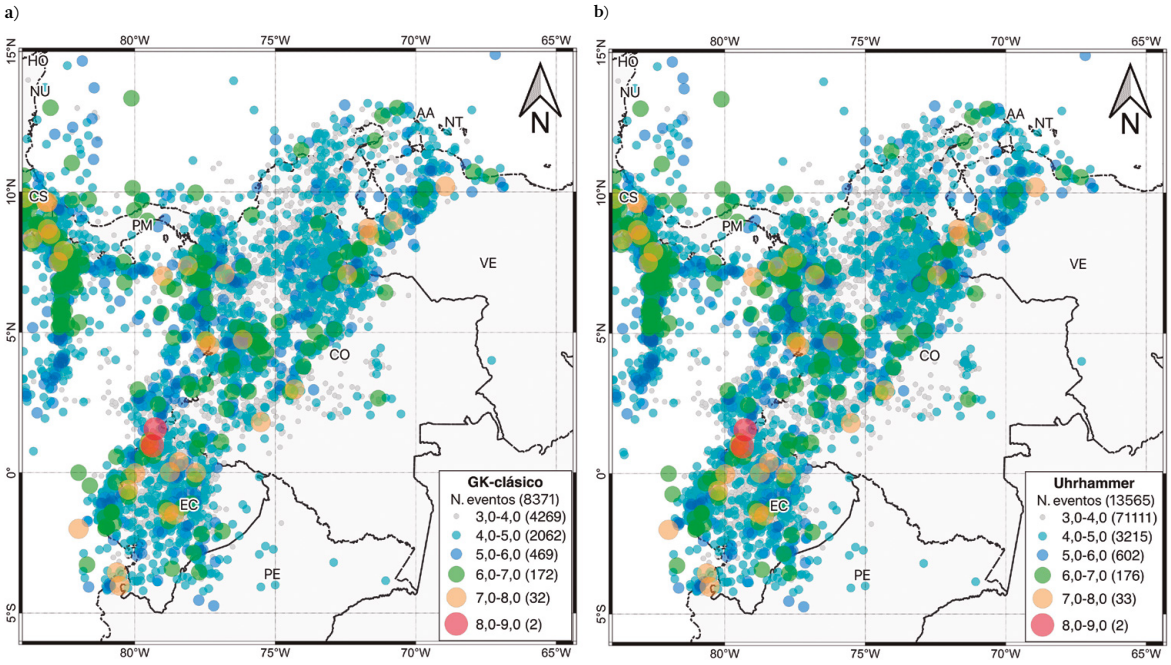



**Figura 17.** Eventos principales resultado de la remoción de eventos dependientes: a) método de Gardner y Knopoff clásico; b) método de Gardner y Knopoff usando la aproximación propuesta por Uhrhammer (1986)

discriminados según el ambiente tectónico predominante. Los resultados obtenidos usando la aproximación propuesta por Uhrhammer (1986) se consideran apropiados, teniendo en cuenta la estabilidad del parámetro *b* de la distribución Gutenberg-Richter y la posibilidad de utilizar un rango de magnitudes mayor.

La figura 17 presenta los resultados de la remoción de eventos dependientes usando el método de Gardner y Knopoff con dos ventanas espacio-temporales diversas: a) clásica y b) Uhrhammer. De esta figura se resalta la diferencia en el número de eventos obtenidos en el rango de magnitudes entre 3 y 5.

La tabla 13 presenta los eventos independientes clasificados según modelos de fuentes y ambientes tectónicos. El porcentaje de remoción o identificación de eventos dependientes usando el catálogo total es significativamente alto. Esto se debe a que un amplio porcentaje del catálogo corresponde a sismicidad intermedia, principalmente de la fuente del nido sísmico de Bucaramanga, por la gran concentración de sismos en un volumen muy restringido y claro.

Para esta fuente, las características de generación de sismos, en términos de magnitud, distancia y tiempo, no corresponden a las relaciones clásicas de sismos principales y réplicas o premonitores.

**Tabla 13.** Clasificación sismo-tectónica de la sismicidad de eventos del catálogo (sin eventos dependientes), según modelos de fuentes

| Ambiente tectónico | N.º eventos (modelo b1) | N.º eventos (modelo b2) |
|---|---|---|
| Cortical | 9.054 | 8.991 |
| Interplaca | 311 | 365 |
| Intraplaca (zona Benioff) | 760 | 790 |
| Profundos (Bucaramanga) | 3.440 | 3.415 |
| **Total** | **13.565** | **13.561** |

**Nota:** La descripción de los modelos de fuentes b1 y b2 se presenta en el capítulo 4.

### 3.1.6 Análisis de completitud

Un catálogo sísmico es una herramienta para establecer tasas de actividad sísmica de las fuentes, entre otras aplicaciones que se definieron previamente. Estas tasas relacionan la cantidad de eventos (según magnitudes) que pueden ocurrir en un periodo de tiempo. Al respecto, es recomendable considerar que a medida que se remonta en el tiempo es posible que se pierda o falte información en tales catálogos.

De los periodos más antiguos, la información proporcionada en los catálogos sísmicos es escasa o in-

completa debido a factores como la ausencia de equipos de registro sísmico, la caracterización de eventos según criterios diferentes de los usados por las metodologías actuales, o bien porque solo se caracterizaban eventos muy fuertes (de magnitud elevada), y se dejaban por fuera eventos de magnitudes menores.

Luego, en periodos en que se comenzó la instrumentación de las redes sismica, la falta de cobertura de redes sísmicas o deficiencias en los procedimientos de detección y localización de eventos, entre otras limitaciones, contribuyen a la falta de consistencia y homogeneidad de los datos.

En los periodos más recientes, el incremento de redes globales, el mejoramiento en la calidad y sensibilidad en detección y registro de equipos sismológicos, el empleo de métodos y procedimientos de localización y estimación de magnitudes más precisos, entre otros factores, incrementan la densidad y calidad de la información de los catálogos sísmicos, lo que redunda en la completitud de datos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, para estimar tasas de actividad sísmica confiables se establecen periodos en los que exista cierta certeza (o pueda admitirse) que el registro de eventos presentes en el catálogo esta completo en un rango de magnitudes determinadas.

En la evaluación de la completitud de un catálogo se identifica la magnitud más baja ($M_c$), para la cual se supone que el 100% de los sismos de magnitudes mayores o iguales a $m_c$ han sido registrados (Woessner y Wiemer, 2005). Dicha magnitud mínima se conoce como *magnitud de completitud*.

Para el cálculo de la completitud, en el CSI se utilizó el método de Stepp (1972), que consiste en identificar intervalos de tiempo en los que la información del catálogo sísmico se considere completa a partir de una magnitud determinada.

Según Stepp (1972), la desviación estándar ($\sigma_\lambda$) de la tasa media de ocurrencia de sismos ($\lambda$) en un periodo de tiempo ($T$) está descrita por

$$\sigma_\lambda = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{T}} \qquad [3.1]$$

Un rango de magnitud durante un periodo de tiempo dado es completo si la variación o tendencia de $\sigma_\lambda$ es similar a la de $1/\sqrt{T}$. En caso contrario, el periodo de tiempo evaluado no es suficiente, o el rango de magnitud considerado no es completo.

En la figura 18 se muestra la variación en el tiempo de $\sigma_\lambda$, correspondiente a diferentes periodos, y la estimación de su magnitud de completitud ($M_c$) correspondiente al CSI del SGC, utilizando un intervalo

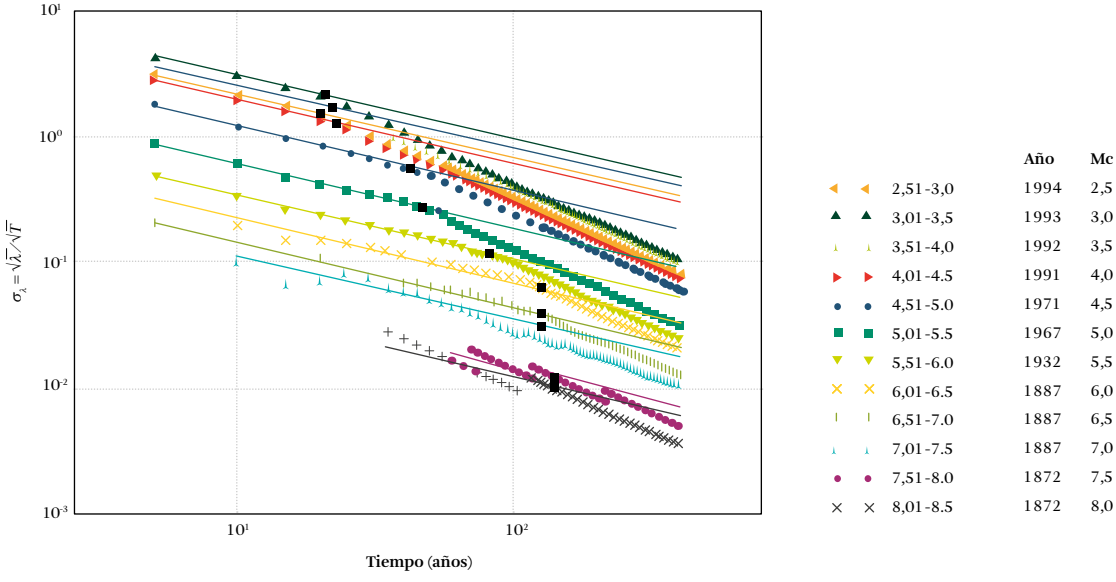



**Figura 18.** Variación en el tiempo (años) de la magnitud de completitud ($M_c$) y su desviación estándar ($\sigma_\lambda$) usando el método de Stepp (1972) en el CSI

de magnitud $\Delta M = 0{,}5$. Los puntos negros corresponden a la $M_c$ de cada periodo.

En la tabla 14 se presentan periodos según rangos de magnitudes de completitud.

**Tabla 14.** Rangos de completitud correspondientes al CSI del SGC

| Periodo | Intervalo de magnitud (Mw) |
|---|---|
| 1994-2014 | 3,5-4,0 |
| 1971-1994 | 4,0-4,5 |
| 1964-1971 | 4,5-5,0 |
| 1932-1964 | 5,0-5,5 |
| 1887-1932 | 5,5-7,0 |
| 1872-1887 | 7,0-7,5 |
| 1610-1872 | ≥ 7,5 |

## 3.2 Base de datos de fallas activas

En la actualidad es cada vez más frecuente incluir un modelo de fallas activas (potencialmente peligrosas) en el análisis de la amenaza sísmica. Esta información es particularmente relevante en regiones donde la información registrada en el catálogo no logra cubrir el intervalo reconocido de ocurrencia de grandes rupturas sísmicas asociadas a estructuras neotectónicas corticales.

La Fundación GEM ha promovido la creación de bases de datos de fallas activas (Pagani *et al.*, 2015; Pagani *et al.*, 2016) en las que se compile y ponga a disposición de la comunidad científica información relevante, o al menos mínima, que pueda ser utilizada en la creación de fuentes sísmicas con esta tipología.

En el caso específico de Suramérica, las deformaciones cuaternarias son principalmente el resultado de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Suramericana a lo largo de la costa oeste en Colombia, Ecuador, Perú y Chile, así como del movimiento transcurrente dextral de la placa del Caribe con respecto a la placa de Suramérica a lo largo de la costa norte del subcontinente en Colombia y Venezuela.

Sismos importantes asociados a fallas, aunque menos frecuentes, son conocidos y han causado daños importantes en Argentina (San Juan, 1994), Perú (Ancash, 1946), Colombia (eje cafetero, 1999) y Venezuela (Caracas, 1967).

El estudio de las deformaciones cuaternarias y su aporte a la caracterización de las fallas consideradas sismogénicas en Suramérica se inició de forma sistemática en los años noventa con los estudios realizados para el proyecto global ILP "World map of major active faults" (Trifonov y Machette, 1993).

En el marco de este proyecto se creó un grupo regional de expertos (Grupo Suramericano de Neotectónica, GSN), que mediante proyectos de colaboración científica internacional, o bien mediante esfuerzos nacionales, fue enriqueciendo una base de datos regional, principalmente de parámetros neotectónicos, que se compiló usando diversos criterios y metodologías (véase, por ejemplo, Audemard *et al.*, 2000; Egüez *et al.*, 2003; Paris *et al.*, 2000).

Esta base inicial fue posteriormente enriquecida en el marco de dos proyectos regionales: el proyecto Multinacional Andino (MAP *et al.*, 2000; Proyecto Multinacional Andino, 2008) y en el proyecto South America Risk Assessment (SARA) (García *et al.*, 2017), promovido por la Fundación GEM. En particular, el proyecto MAP contribuyó a la compilación de aproximadamente seiscientas estructuras neotectónicas organizadas en una base digital georreferenciada, muchas de ellas nuevas o una versión revisada de la propuesta precedente. Un buen resumen del estado del conocimiento sobre esta temática a escala continental es presentado por Costa *et al.* (2006).

Por otra parte, en el marco de las actividades del proyecto SARA fue posible revisar y mejorar la información recopilada por los expertos nacionales, y homogeneizarla a nivel continental (García *et al.*, 2017). En el proceso de revisión y homogeneización de las estructuras neotectónicas, a pesar de la variabilidad y la calidad de la información, fue posible identificar estructuras prioritarias desde un punto de vista sismo-tectónico, así como determinar su posible contribución a la amenaza continental desde un punto de vista puramente geotectónico (figura 19).

El SGC ha participado en todas las iniciativas citadas. La compilación de las estructuras neotectónicas de Colombia en el GSN ha tenido como punto de partida el estudio de Paris *et al.* (2000), realizado en el marco del proyecto ILP (véase la figura 20). De manera simultánea, el SGC creó una base de datos

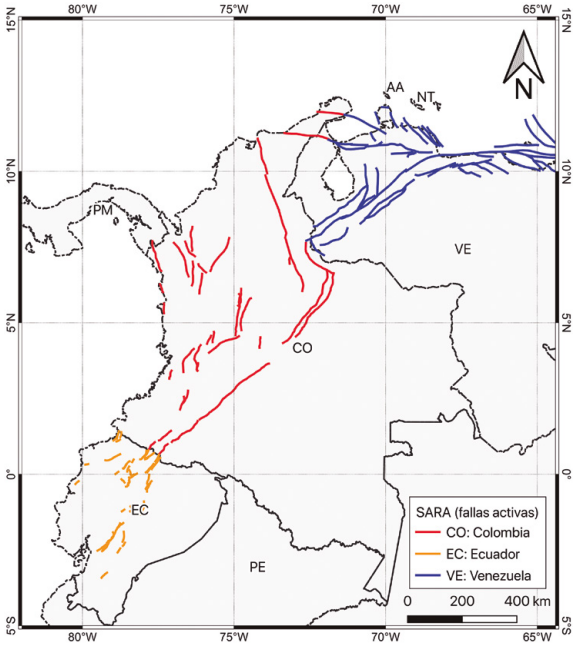



**Figura 19.** Base de datos de fallas activas del proyecto SARA (v. 1.0). Las estructuras han sido representadas por la traza superficial

de fallas activas (Montes y Sandoval, 2001). Estas compilaciones recogen información en muchos casos obtenida durante proyectos de reconocimiento regional, y, en unos pocos casos, son el resultado de trabajos de exploración realizados por especialistas en neotectónica.

Con el fin de incluir fallas activas en el modelo de amenaza sísmica de Colombia, en el presente estudio se utilizó una versión revisada de la base de datos nacional creada en el marco del proyecto SARA. Esta base de datos contiene información sobre estructuras neotectónicas (o fallas activas prioritarias) escogidas siguiendo tres criterios fundamentales:

- La tasa de deformación anual referida a la falla es igual o mayor de 0,1 mm/año
- Evidencia de actividad tectónica confirmada en el Pleistoceno tardío
- Evidencia de actividad sísmica, confirmada o inferida, en sismos con magnitud (Mw) mayor de 5,5

**Tabla 15.** Estructura de la base de datos paramétrica de las fallas activas

| Parámetro | Formato | Descripción |
|---|---|---|
| | | **Características generales** |
| **Id** | Texto | Identificador de la falla o segmento de falla |
| **accuracy** | Texto | Escala a la que fue cartografiada la traza |
| **is_active** | Entero | Grado de certeza de actividad cuaternaria |
| **name** | Texto | Nombre de la falla |
| **fs_name** | Texto | Nombre del sistema de fallas (si es necesario) |
| **last_movement** | Texto | Fecha del último movimiento reconocido |
| **exposure_quality** | Entero | Cuán visible es la traza en superficie |
| **epistemic_quality** | Entero | Grado de certeza |
| **reference** | Texto | Referencias bibliográficas |
| **notes** | Texto | Información adicional relevante |
| | | **Características geométricos** |
| **average_dip** | Tupla | Ángulo de buzamiento promedio |
| **dip_dir** | Texto | Dirección del buzamiento |
| **downthrown_side_id** | Texto | Dirección del labio hundido de la falla |
| **wkt_geometry** | Texto | Geometría de la falla en formato WKT (*well-known text*) |
| | | **Características geodinámicas** |
| **slip_type** | Texto | Tipo de movimiento cinemático predominante |
| **net_slip_rate** | Tupla | Tasa de deslizamiento anual total |
| **strike_slip_rate** | Tupla | Tasa de deslizamiento anual en la dirección del rumbo |
| **vert_slip_rate** | Tupla | Tasa de deslizamiento anual vertical |
| **shortening_rate** | Tupla | Tasa de deslizamiento anual horizontal |
| **average_rake** | Tupla | *Rake* de la falla según la convención propuesta por Aki y Richards (1980) |

**Formatos**

**Tupla**. Es un trío de números enteros, o de punto flotante, que representan la incertidumbre de una variable o parámetro que caracteriza una falla (p. ej., tasa de deslizamiento anual). En este caso específico tiene el siguiente significado: (valor preferido, valor mínimo, valor máximo).

**Entero.** Formato numérico usado para categorizar variables referidas a la incertidumbre/calidad de la información compilada (p. ej., epistemic_quality: 1: alta certeza, 2: certeza moderada, 3: incierta).

**Texto**. Término referido a datos tipo texto (p. ej., dip_dir: N, norte geográfico).

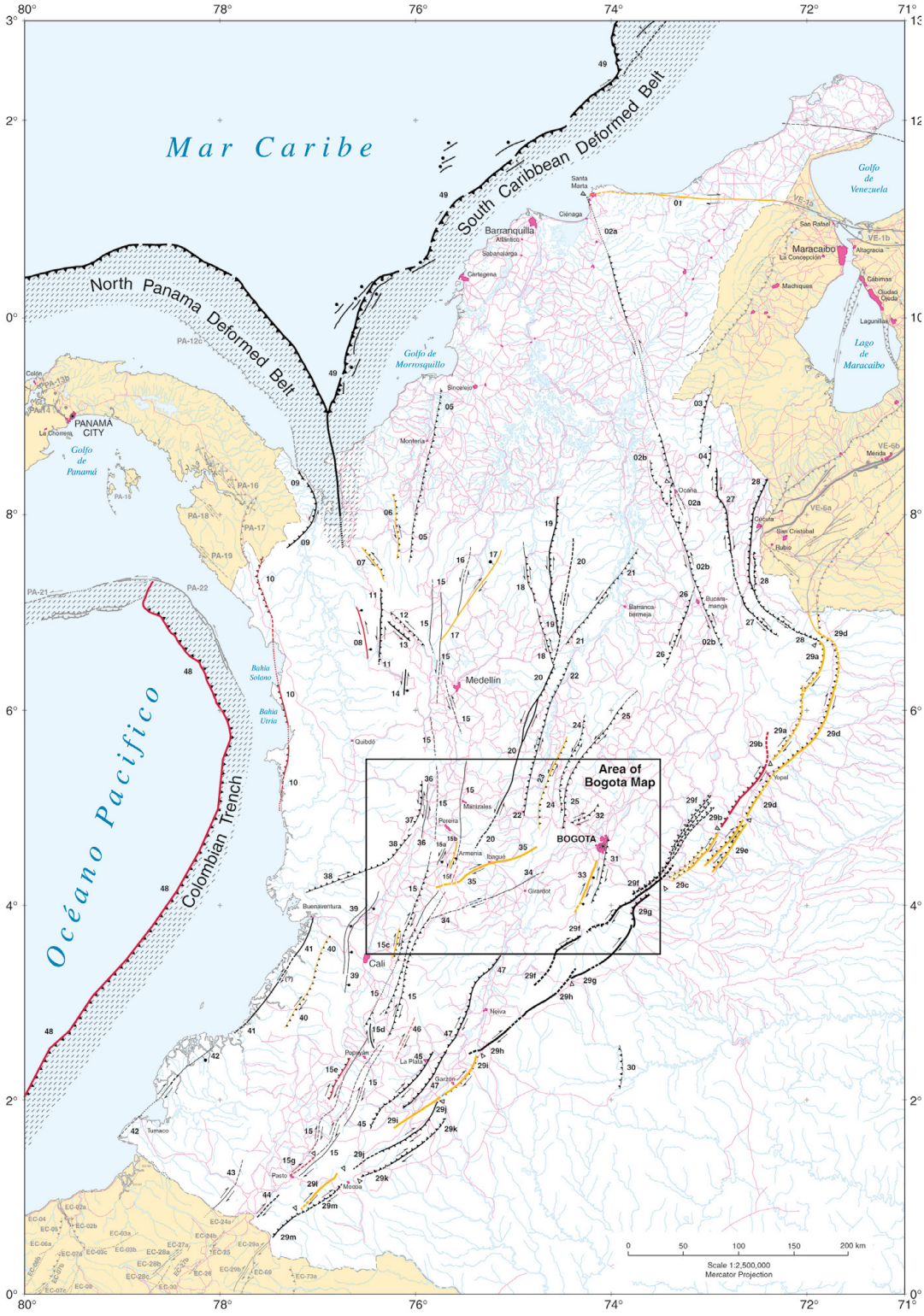



**Figura 20.** Mapas de fallas cuaternarias
Fuente: Paris *et al.* (2000)

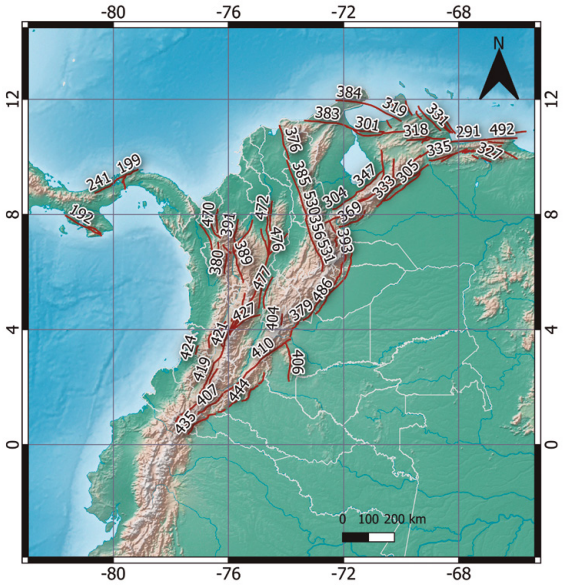



**Figura 21.** Base de datos de fallas activas utilizadas en el modelo. Las estructuras han sido representadas por la traza superficial

La figura 21 presenta la base de datos de fallas compilada de Colombia y países colindantes, como Venezuela y Panamá. Por su parte, la tabla 15 presenta los parámetros (y su formato) que caracterizan cada una de las estructuras.

## 3.3. Base de datos de movimientos fuertes

La base de datos de movimientos fuertes corresponde a la consolidación de un conjunto de registros acelerográficos de eventos sísmicos. De cada evento se encuentra información suficiente para determinar su ubicación, magnitud y mecanismo focal. Asimismo, la base de datos de movimientos fuertes cuenta con información de las estaciones de la Red Acelerográfica, de tal manera que es posible caracterizar los posibles efectos sísmicos locales de cada estación utilizando parámetros relacionados con la velocidad de onda de corte a diferentes profundidades.

La base de datos de movimientos fuertes está organizada según las regiones tectónicas identificadas en el modelo de fuentes sismogénicas del país (véase el capítulo 4). Esta base de datos es útil para obtener las aceleraciones espectrales de los sismos registrados. Estos datos también se utilizan para seleccionar las ecuaciones de atenuación que mejor se ajustan a las intensidades del movimiento observadas (véase el capítulo 5).

### 3.3.1 Información por región tectónica

En la base de datos de movimiento fuerte se usaron eventos sísmicos con mecanismo focal determinado en el Catálogo del GCMT (Elkstrom et al., 2012), los cuales fueron clasificados según la región tectónica a la que pertenecen. En el área de estudio se reconocen cuatro regiones tectónicas principales: corteza activa (cortical), zona de subducción (interplaca) en la costa pacífica, zona de Benioff (intraplaca) y zona del nido sísmico de Bucaramanga (intraplaca). El modelo de fuentes se amplía en el capítulo 4.

Por otro lado, la base de acelerogramas está construida a partir de los registros de la Red de Acelerógrafos del SGC y de los registros del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador (IGEPN, 2018; IGEPN, 2016) correspondientes al sismo de abril de 2016 y sus réplicas. En total, se encuentran 1.786 registros (triaxiales) de 118 eventos. El ambiente tectónico del que se tienen más registros es el cortical, con más de 600 acelerogramas, mientras que la zona interplaca en la subducción del Pacífico tiene el menor número de registros: aproximadamente 250 (tabla 16). La distribución de los acelerogramas registrados se puede observar en la figura 22a.

**Tabla 16.** Registros acelerográficos por ambiente tectónico

| Ambiente tectónico | N.º de Registros | Profundidad promedio (km) | Rango Mw |
|---|---|---|---|
| Cortical | 607 | 25 | 4,8-7 |
| Nido | 485 | 147 | 4,8-6,25 |
| Benioff | 435 | 131 | 4,8-7,3 |
| Interplaca | 259 | 22 | 5-7,8 |

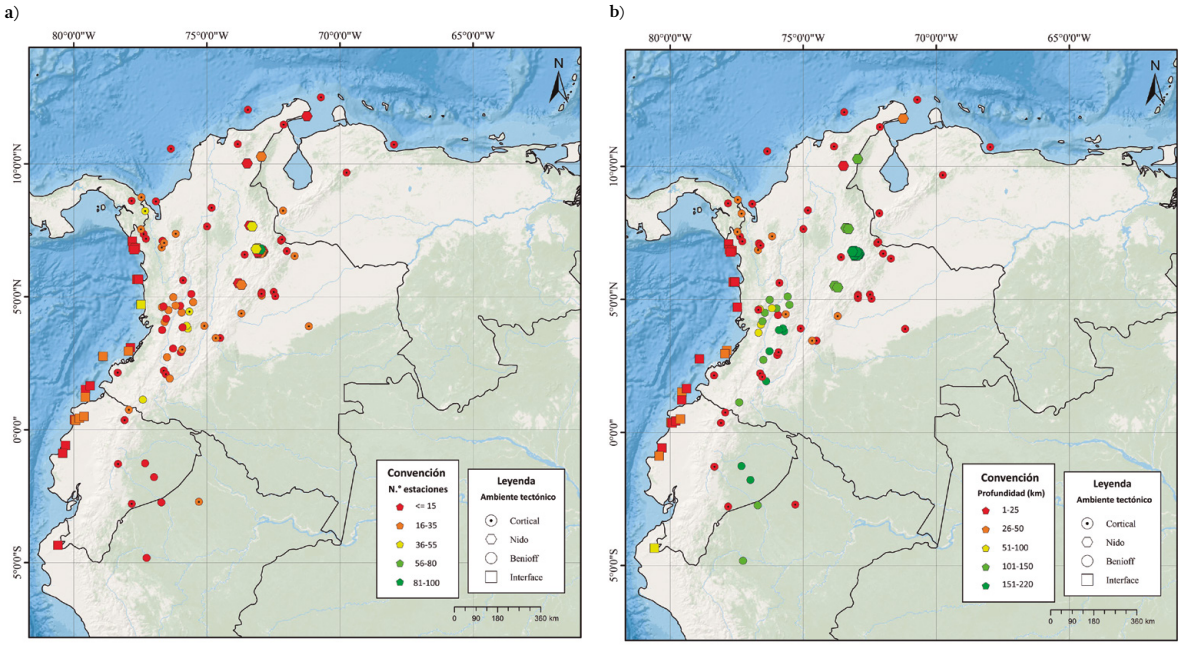



**Figura 22. a)** Distribución de los registros de la base de datos de movimiento fuerte. **b)** Distribución de las profundidades de los eventos

Además del número de registros, es importante observar tanto la profundidad como la magnitud de los eventos. En cuanto a las profundidades promedio, hay dos zonas con profundidades menores de 30 km: la zona cortical y la zona interplaca. En cambio, en las zonas de Benioff y nido se observan profundidades que por lo general superan los 100 km (tabla 16). La distribución de las profundidades de los eventos se puede observar en la figura 22b.

La figura 23 presenta la distribución de los eventos según magnitudes y ambiente tectónico. En esta figura se observa que las mayores magnitudes se encuentran en la zona de subducción del Pacífico, con valores mayores de 7.5 en términos de Mw, mientras que la mayoría de eventos registrados tienen magnitudes menores de 6.

Los mecanismos focales fueron agrupados en normales (N), inversos (R) y *strike-slip* (S) (Kaverina *et al.*, 1996). En la figura 24 se observa que en la zona interplaca predominan los sismos de mecanismo inverso a lo largo de toda la costa pacífica, desde el norte de Perú hasta la frontera entre Colombia y Panamá. Por otro lado, los de tipo *strike-slip* predominan en la zona cortical. En las zonas intraplaca, o *inslab*, se encuentran

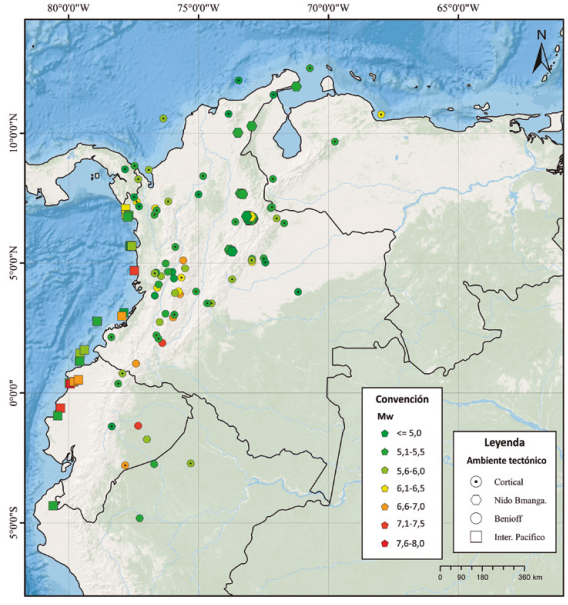



**Figura 23.** Distribución de magnitudes (Mw) de los eventos seleccionados

zonas complejas compuestas por sismos de diversos mecanismos en un área muy reducida. En la tabla 17 se puede observar el número de eventos por mecanismo focal en cada una de las cuatro regiones tectónicas.

Para mayor detalle sobre la base de datos de movimiento fuerte se recomienda consultar el anexo B.

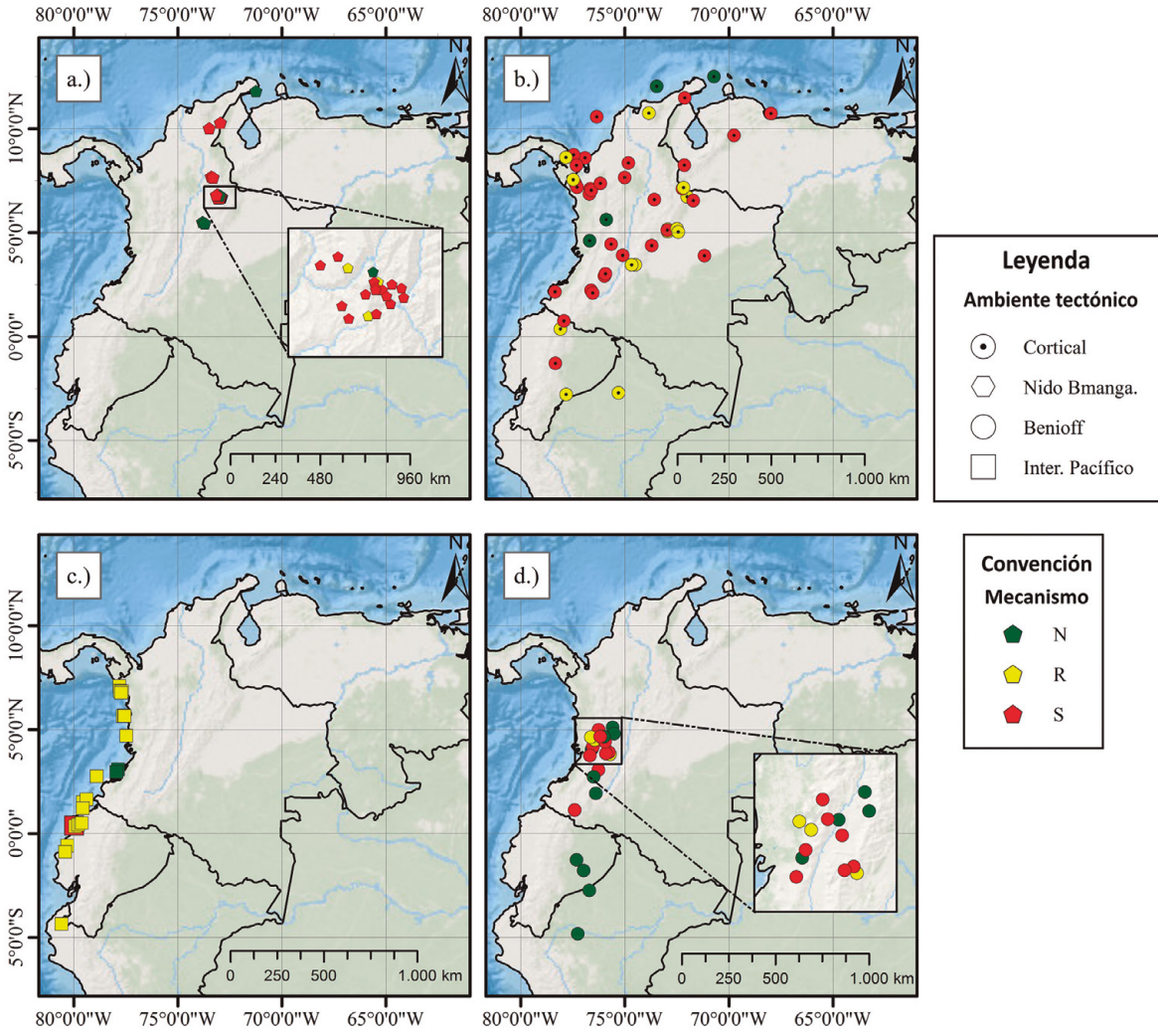



**Figura 24.** Distribución de mecanismos focales por región tectónica. **a)** Nido. **b)** Cortical. **c)** Interface. **d)** Benioff

**Tabla 17.** Número y tipos de mecanismos focales por región tectónica

| Ambiente tectónico | Normal (N) | Inverso (R) | Strike slip (S) |
|---|---|---|---|
| Cortical | 4 | 14 | 31 |
| Nido | 4 | 3 | 19 |
| Benioff | 10 | 3 | 9 |
| Interface | 2 | 18 | 1 |

### 3.3.2 Base de datos de estaciones

Con el fin de identificar posibles efectos de sitio en las estaciones de monitoreo sísmico, se definieron las variables geotécnicas y geofísicas de mayor relevancia correspondientes a la localización de cada estación. De esta manera se calcularon los valores de $Z_1$ y $Z_{2,5}$, que corresponden a las profundidades en las que se encuentran velocidades de onda cortante (Vs) de 1 y 2,5 Km/s , respectivamente. Además, se calculó el valor de $Vs_{30}$ en cada estación, que corresponde al promedio de la velocidad de onda de corte en los 30 metros más superficiales del suelo.

El valor de $Vs_{30}$ ha sido utilizado ampliamente en la clasificación de suelos, la definición de factores

de amplificación y en la estimación simplificada de efectos de sitio (Dobry *et al.*, 2000). En la figura 25 se presenta la localización de las 206 estaciones de las que se tienen registros y los valores de $Vs_{30}$ correspondientes.

Los valores de $Vs_{30}$ fueron estimados cuando no se tuvo una medición directa, siguiendo las metodologías sugeridas por Wald y Allen (2009), Wald *et al.* (2011), Thompson y Wald (2012) y Thompson *et al.* (2014). De esta manera, el valor de $Vs_{30}$ fue asignado a las estaciones utilizando la versión actualizada del mapa nacional realizado por el SGC en el año 2016, con una resolución de 7,5 arcosegundos.

En el cálculo de $Z_1$ y $Z_{2,5}$ en el territorio colombiano (continental e insular) se usó información disponible generada por mediciones geofísicas o directas como perforaciones, además de estudios de tomografía y los mapas de variación de la velocidad de onda de corte (Vs) en la corteza intermedia y superior en la zona de estudio (Poveda *et al.*, 2018).

Debido a que esta información no cubre el área total estudiada, se utilizó una malla igualmente espaciada de aproximadamente 10 x 10 km en la que se asignaron valores promedio de $Z_1$ y $Z_{2,5}$, siguiendo las ecuaciones que relacionan $Vs_{30}$ y $Z_1$, como las desarrolladas por Abrahamsom y Silva (2008), Chiou y Youngs (2008) y Chiou y Youngs (2014).

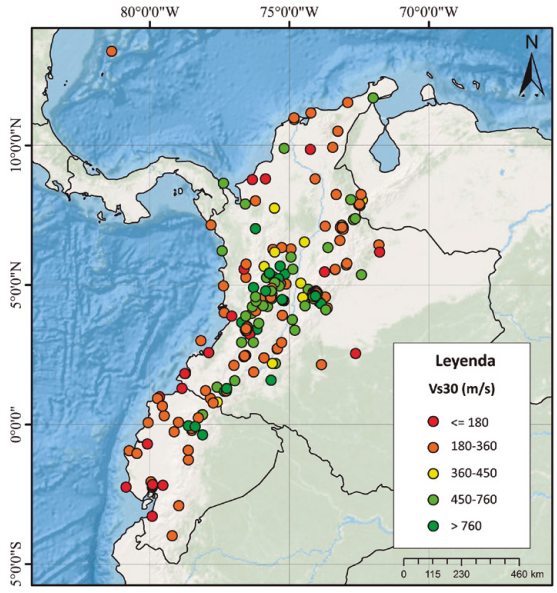



**Figura 25.** $Vs_{30}$ (m/s) inferido en las estaciones de registro

Para el cálculo de $Z_1$ se seleccionaron valores estimados a partir de Abrahamson y Silva (2008), después de un análisis de control, coherencia y ajuste con los datos existentes. Para la estimación de $Z_{2,5}$, en los casos en que no había información disponible, se usó la ecuación propuesta por Campbell y Bozorgnia (2007).

Con el fin de observar los contrastes de frontera de estos modelos y ajustar los calculados, se compararon los valores de Poveda *et al.* (2018) y los calculados con Abrahamson y Silva (2008). Por último, los

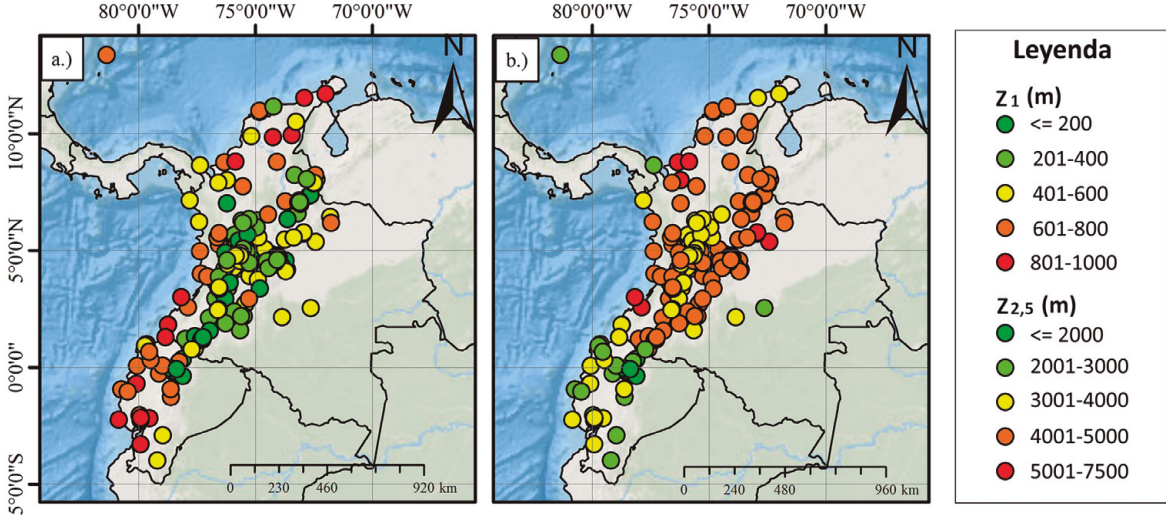



**Figura 26. a)** $Z_1$. **b)** $Z_{2,5}$ (m) inferido de las estaciones de registro

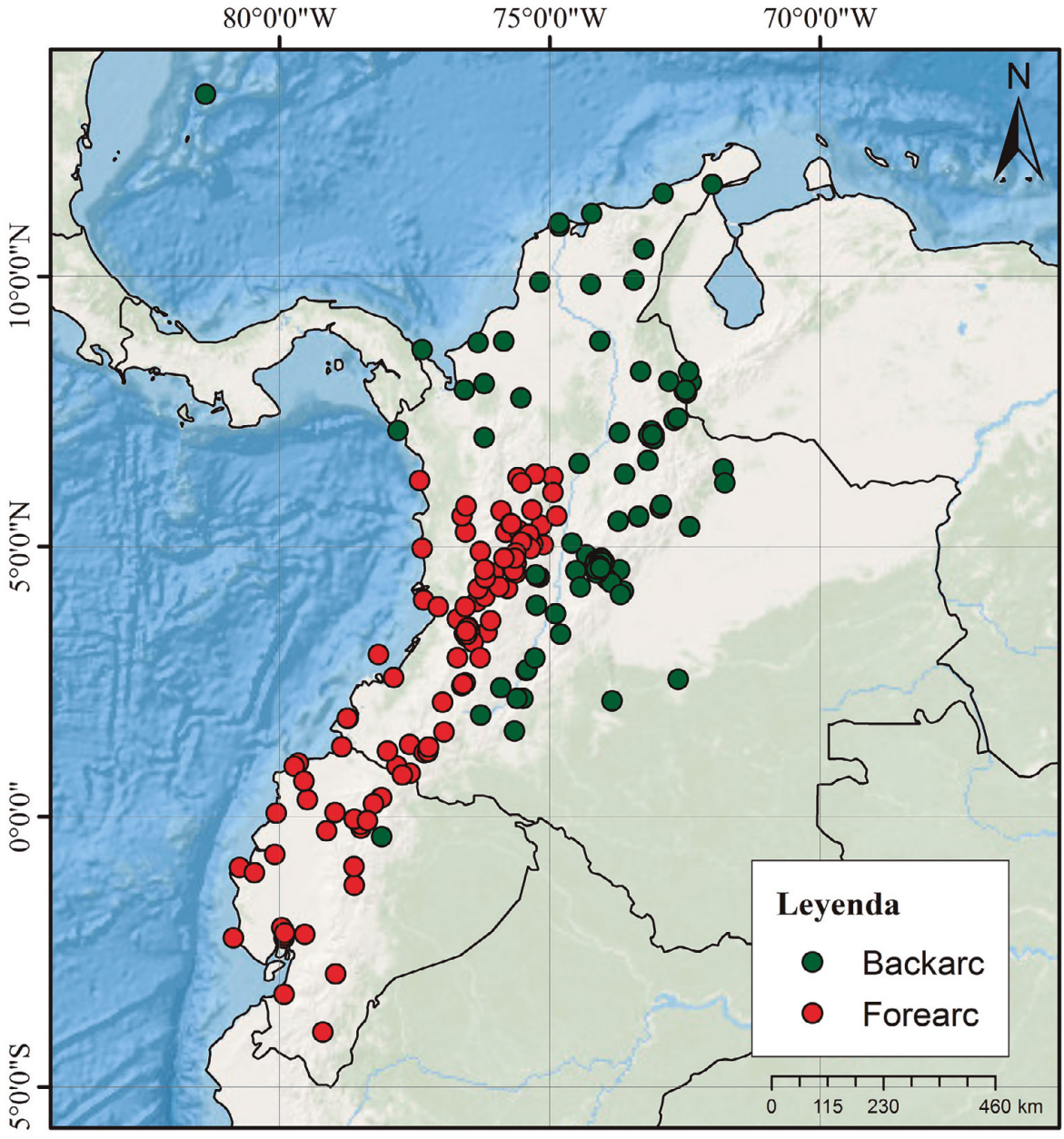



**Figura 27.** Distribución de las estaciones de registro alrededor del arco volcánico

**Tabla 18.** Número de eventos por rango de $Vs_{30}$ y fuente sísmica

| Rango $Vs_{30}$ | Cortical | Bucaramanga | Benioff | Interplaca | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| **< 180** | 36 | 56 | 35 | 41 | 168 |
| **180-360** | 252 | 199 | 175 | 124 | 750 |
| **360-450** | 31 | 27 | 12 | 2 | 72 |
| **450-760** | 197 | 149 | 122 | 52 | 520 |
| **> 760** | 91 | 54 | 91 | 40 | 276 |
| **Total** | 607 | 485 | 435 | 259 | 1.786 |

valores estimados de $Z_1$ y $Z_{2,5}$ fueron integrados a la información disponible para generar un modelo final. Los valores de $Z_1$ y $Z_{2,5}$ asignados a las estaciones acelerográficas se presentan en la figura 26.

Además de estos valores, que permiten estimar el efecto de las cuencas en los registros sísmicos, se asignó a cada estación una variable que permite validar la posición de cada estación con respecto al arco volcánico (véase la figura 27 ).

A partir de la caracterización de las estaciones, la tabla 18 presenta el número de registros por rango de $Vs_{30}$ y fuente sismogénica. Esta clasificación es útil para incluir de manera aproximada los efectos de sitio en la estimación de la amenaza sísmica.

### 3.3.3 Procesamiento de acelerogramas

Los registros acelerográficos del catálogo construido fueron procesados con una adaptación de la metodología desarrollada por el Pacific Earthquake Engineering Research Center (Ancheta *et al.*, 2013), que se resume en un proceso iterativo en el que el registro se somete a una corrección de línea base y a un proceso de filtrado en el dominio de la frecuencia.

En la figura 28 se presenta un esquema del proceso de filtrado adaptado en el presente estudio, partiendo de que las señales que se van a analizar ya contienen una corrección instrumental. El proceso detallado del procesamiento de las señales de aceleración se presenta en el anexo C.

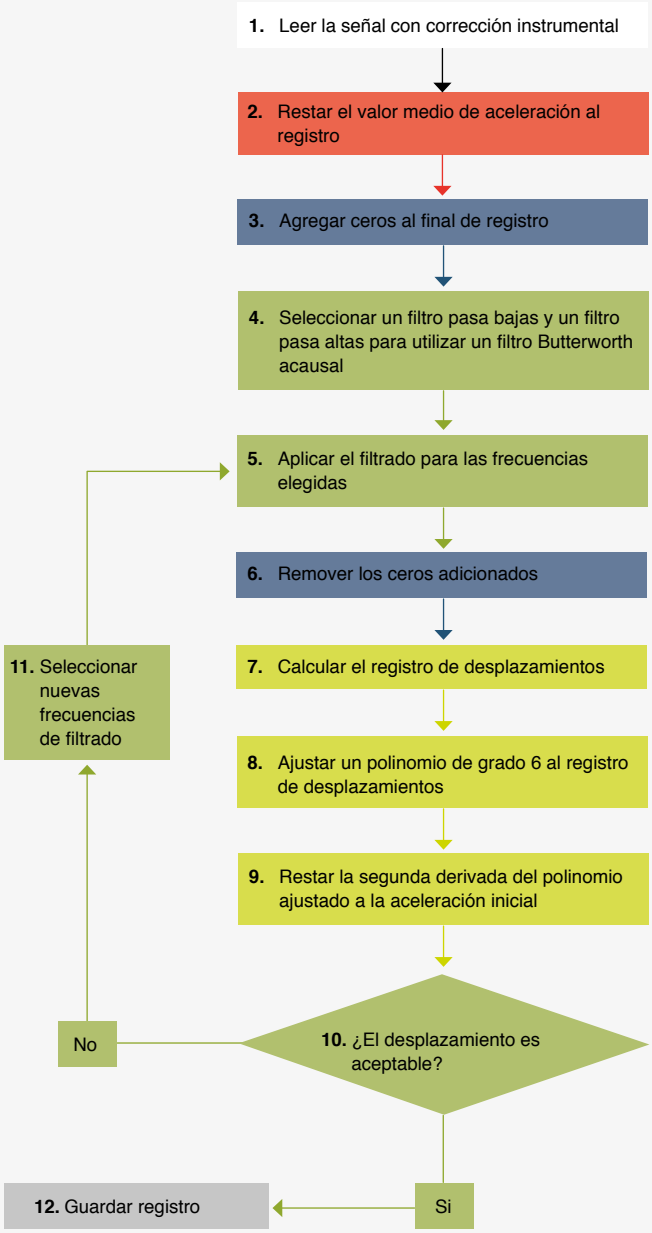



**Figura 28.** Esquema de procesamiento de acelerogramas

# 4

# Modelo de fuentes sísmicas

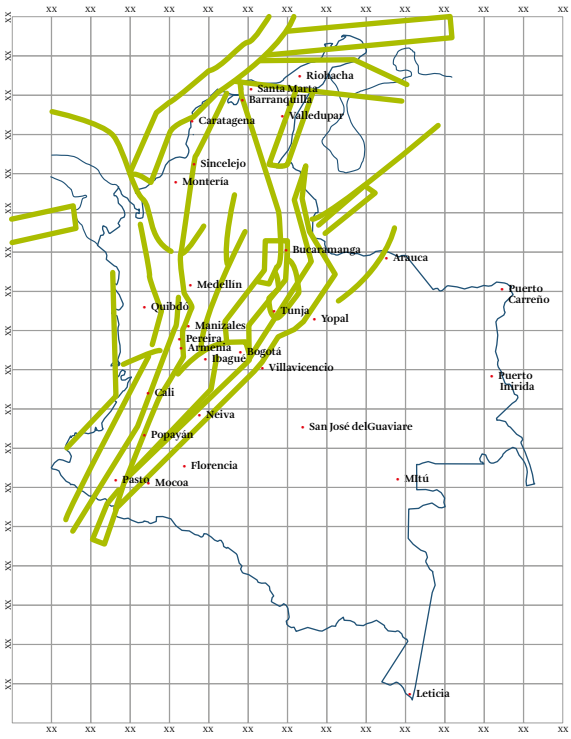
Entre los componentes del análisis de amenaza sísmica, un modelo de fuentes es una herramienta para caracterizar una zona de estudio según la magnitud y recurrencia de los sismos que puede generar. Para este fin, es necesario identificar y definir las fuentes presentes en dicha zona.

En geología, una fuente sísmica es un volumen de la litósfera en el que, se presume, pueden ocurrir sismos con origen tectónico similar (Sarria, 1995). Para definir estas fuentes es relevante conocer su ubicación, su actividad (descrita en términos de la recurrencia de magnitudes de sismos asociados a dicha fuente), así como la magnitud máxima de los sismos que pueden producir (Sarria, 1995).

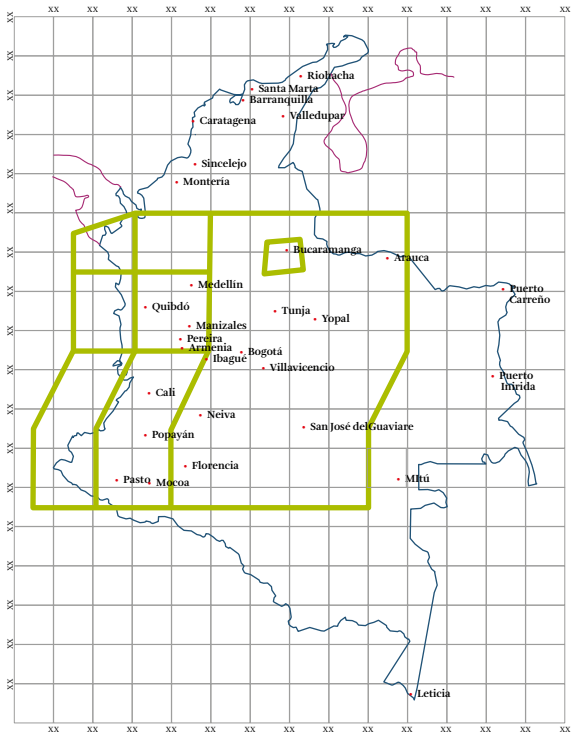
En Colombia se han propuesto diferentes modelos de fuentes sísmicas. Entre los más recientes se encuentran los elaborados por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS, 2009, publicado en Salgado *et al.*, 2010), que han servido de soporte para la definición de coeficientes sísmicos de diseño del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (MAVDT, 2010). En dicho estudio se determinó un conjunto de polígonos para describir la sismicidad de fuentes superficiales, así como un conjunto de zonas para modelar sismos profundos relacionados con procesos de subducción en el Pacífico y en el nido sísmico de Bucaramanga (véase la figura 29).

Por su parte, el Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas, hoy Servicio Geológico Colombiano) y la Universidad Nacional de Colombia elaboraron en conjunto un modelo de amenaza sísmica (Ingeominas y Universidad Nacional de Colombia, 2010). La figura 29c presenta las fuentes consideradas en dicho modelo.

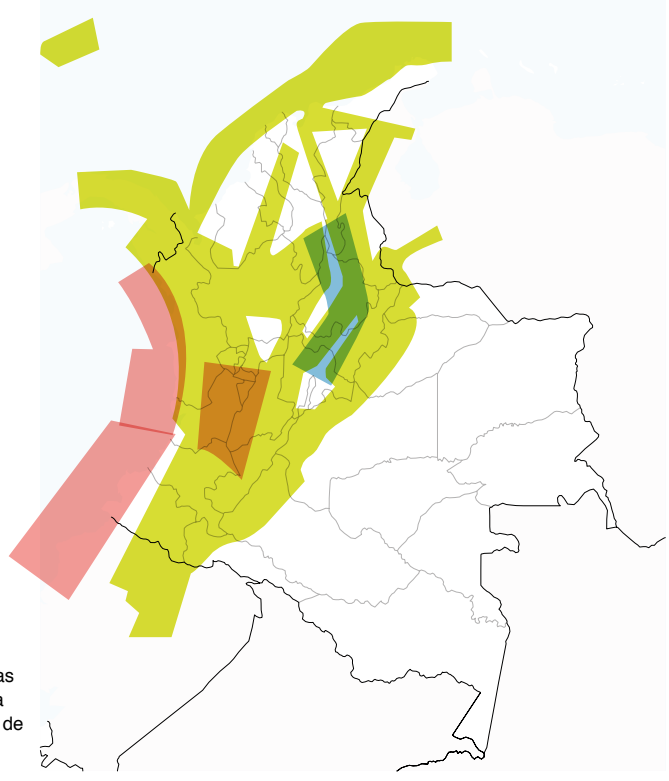
Tanto los modelos como los resultados de los anteriores estudios (Comité AIS 300 e Ingeominas y Universidad Nacional de Colombia) fueron revisados por el doctor Mario Ordaz, en el marco de un convenio en el que participaron el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territo-




**(a)** Plano de fuentes superficiales




**(b)** Plano de fuentes profundas




**(c)** Fuentes propuestas por el Ingeominas y la Universidad Nacional de Colombia

**Figura 29.** Fuentes sismogénicas propuestas por la AIS (2009): **a)** superficiales; **b)** profundas; **c)** zonificación propuesta por el Ingeominas y la Universidad Nacional de Colombia (2010)

rial y la AIS. Mediante dicho convenio se buscó tener un control de calidad de los estudios de amenaza existentes. Como resultado de esa revisión se obtuvieron diversos comentarios y observaciones sobre cada modelo, que fueron atendidos por los autores, y a partir de los cuales se elaboró uno definitivo (MAVDT, 2010).

Entre los resultados de dicho proceso de evaluación vale la pena resaltar que, a juicio del revisor, las fuentes propuestas por el Ingeominas (véase figura 29c) reflejaban un buen conocimiento de los procesos tectónicos del país, y merece ser valorado como un modelo de fuentes más avanzado que el utilizado en los cálculos del mapa de amenaza de la Norma Sismo Resistente NSR-98 (Ordaz, 2009).

Considerando que la definición de fuentes sísmicas puede ser subjetiva y puede estar determinada por el criterio de expertos (Ansari *et al.*, 2015), el SGC, en conjunto con investigadores del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), elaboró un procedimiento para la definición de fuentes sísmicas. Dicho procedimiento fue aplicado al caso de Colombia (Arcila *et al.*, 2017), y sus resultados han sido presentados en foros de amenaza sísmica promovidos por el SGC.

A partir del conocimiento existente, y con el fin de contribuir a la definición de fuentes sísmicas con fines de evaluación de amenaza, el SGC y la Fundación Global Earthquake Model (GEM) elaboraron en conjunto un modelo cuyas principales características se describen en este capítulo. En la figura 30 se presenta un esquema de las principales actividades y componentes de dicho modelo.

De acuerdo con García Mayordomo (2015), las fuentes sísmicas determinan la distribución geográfica del peligro sísmico. Por esta razón, es relevante dedicar esfuerzos a la definición de un modelo de fuentes sísmicas a partir de datos actualizados, con la participación de un equipo multidisciplinario que vincule criterios geológicos, sismológicos y estadísticos orientados a la estimación de la amenaza en formatos que sean de utilidad para la comunidad general. Tales son los principios orientadores que el SGC acogió para elaborar el modelo de fuentes sísmicas y, en general, el modelo de amenaza del presente estudio.

En este capítulo se presenta una descripción de los insumos, metodologías y resultados relacionados con la caracterización de fuentes sísmicas de Colombia, considerando diferentes ambientes tectónicos, distintas alternativas de modelación de la sismicidad y diversos supuestos sobre la geometría de las fuentes.

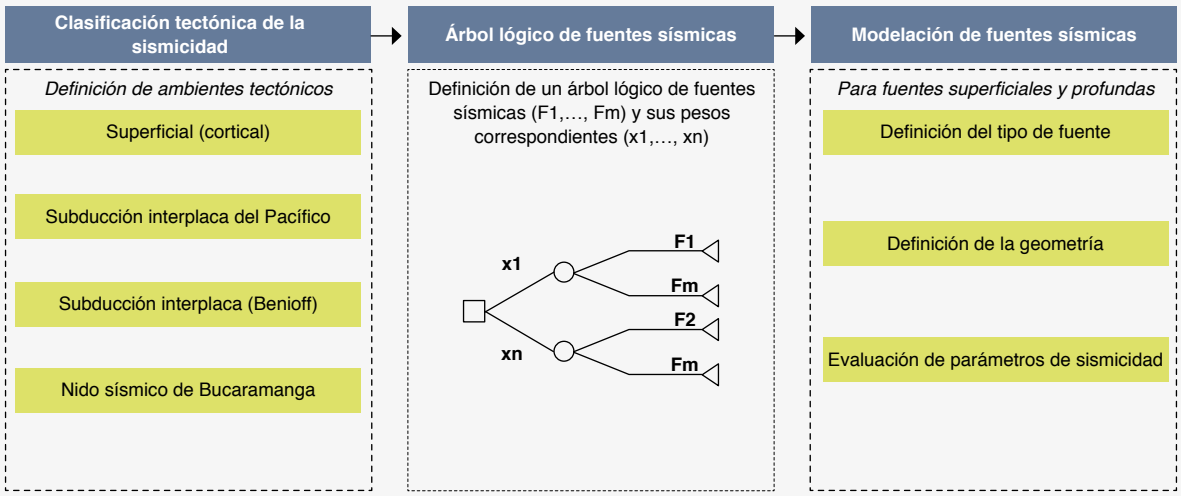



**Figura 30.** Esquema general de actividades del modelo de fuentes sísmicas

## 4.1 Clasificación tectónica de la sismicidad

Entre los esfuerzos para comprender la amenaza sísmica, el estudio de la tectónica es útil para identificar procesos de deformación de la corteza terrestre, que determinan la distribución geográfica, ocurrencia y características de los sismos. Tal análisis es relevante, entre otros aspectos, para identificar regiones (ambientes tectónicos) que originen sismos de propiedades similares.

A nivel global existen diversos estudios en los que se ha llevado a cabo una regionalización tectónica. En Chen *et al.* (2018) se presenta una metodología y resultados para llevar a cabo una regionalización útil para la evaluación de la amenaza sísmica, a partir de información de catálogos sísmicos e información geológica y sismológica, entre otras fuentes.

En Chen *et al.* (2018), las zonas se clasifican en regiones oceánicas (estables o activas), regiones continentales (estable o superficial activa), así como zonas de procesos de subducción (véase la figura 31). A partir de este análisis se encuentra que en el territorio colombiano se encuentran, principalmente, regiones superficiales activas, procesos de subducción y zonas continentales estables (no cratónicas).

En el estudio de la tectónica del territorio colombiano se han propuesto diferentes modelos (por ejemplo, Taboada *et al.*, 1998; Taboada *et al.*, 2000) que examinan los complejos procesos geodinámicos presentes en la región. En tales modelos se consideran, entre otras, las siguientes dinámicas (véase la figura 32):

- La convergencia de las placas de Nazca y del Caribe hacia la placa de Suramérica
- El desplazamiento del bloque de Panamá en sentido W-E hacia la placa de Suramérica
- El desplazamiento del bloque de los Andes en dirección SSW-NNE

De acuerdo con Taboada *et al.* (1998), en Colombia se presentan principalmente los siguientes ambientes tectónicos: i) sismos de corteza asociados a los principales sistemas de fallas (sismicidad andina); ii) sismicidad de subducción del Pacífico; iii) sismicidad intermedia de Boyacá-Santander y Nido de Bucaramanga; iv) sismicidad de corteza difusa.

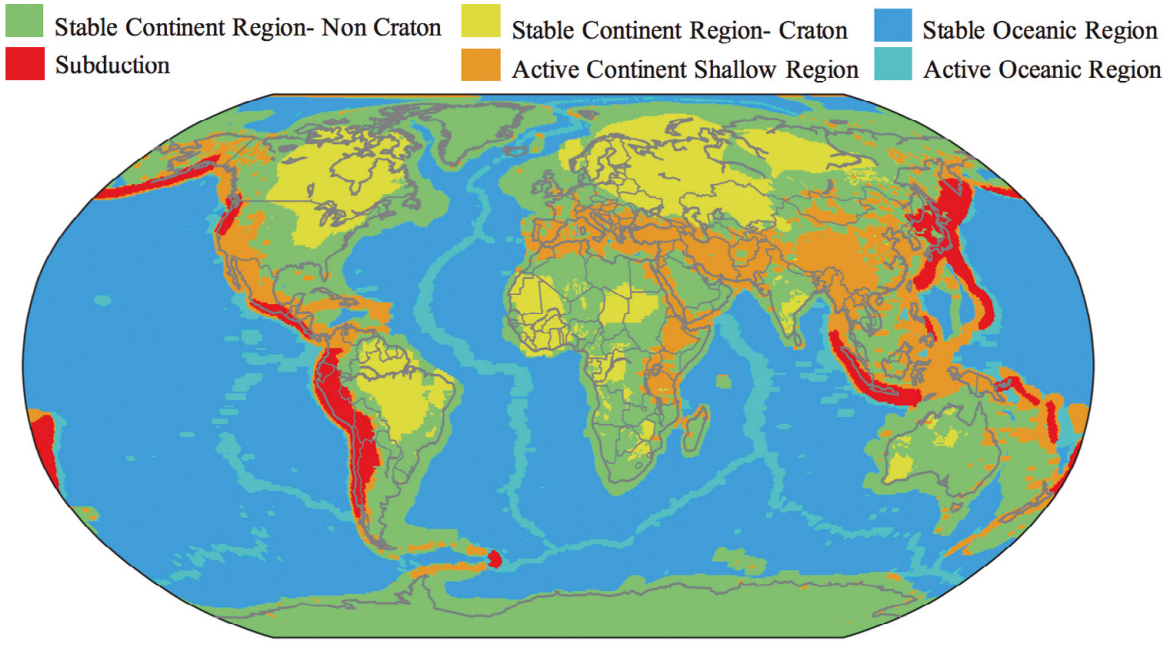



**Figura 31.** Tectónica regional
**Fuente:** Chen *et al.* (2018)

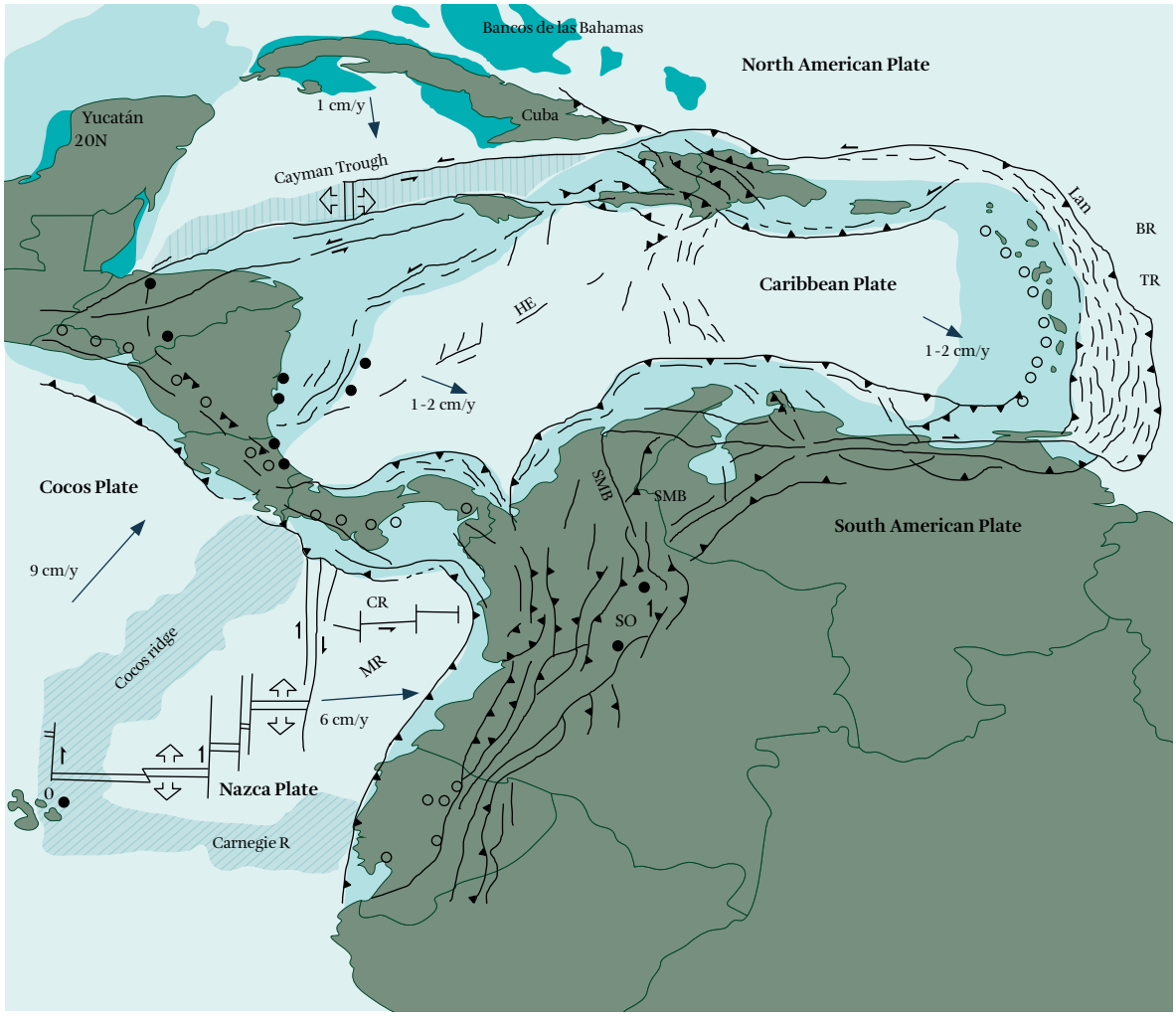



**Figura 32.** Configuración neotectónica de la región Caribe y el norte de los Andes
**Fuente:** tomado y modificado de Taboada *et al.* (2000)

A partir del conocimiento tectónico existente, relevante para la modelación de la amenaza sísmica, en el presente estudio se han considerado los siguientes ambientes tectónicos: i) superficial (cortical); ii) zona interplaca del proceso de subducción del Pacífico; iii) zona intraplaca (profunda) del proceso de subducción del Pacífico (Benioff); iv) zona de subducción profunda del Nido de Bucaramanga. A continuación se presenta una breve descripción de estos ambientes.

### 4.1.1 Ambiente cortical

La actividad sísmica cortical (superficial) está acotada por el límite corteza-manto superior o discontinuidad de Mohorovičić ("moho"). Generalmente, este límite se asocia con profundidades menores de 70 km. No obstante, este límite es variable y debe ser bien establecido en regiones como Colombia, en donde diversos tipos de ambientes tectónicos están intrínsecamente relacionados.

Existen varios modelos que predicen este límite (o el espesor de la corteza) utilizando diferentes metodologías y escalas (Laske *et al.*, 2013; Pasyanos *et al.*, 2014; Van der Meijde *et al.*, 2013). En el presente estudio se adoptó un modelo predictivo de la profundidad del límite moho, que fue creado por especialistas del SGC (véase la figura 33).

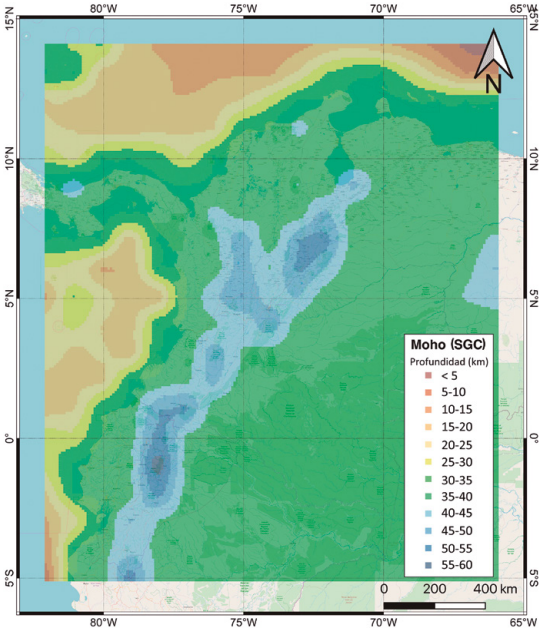



**Figura 33.** Mapa del límite de la transición corteza-manto ("moho") en la región de estudio
**Fuente:** Arcila (inédito)

### 4.1.2 Zona de subducción del Pacífico (interplaca)

En términos generales, un proceso de subducción corresponde al choque entre placas litosféricas, en el cual una de las placas se desliza por debajo de la otra (figura 34). A los sismos que ocurren entre los límites de convergencia de dos placas se les denomina *interplaca* (Sarria, 1995).

En particular, la subducción del Pacífico colombiano corresponde a la zona de contacto entre la placa de Nazca y la placa Suramérica. En esta zona se han originado sismos de magnitudes considerables, como los ocurridos cerca de Tumaco en enero de 1906 (magnitud 8,8 Mw) y el de diciembre de 1979 (magnitud 8,1 Mw). Estos sismos causaron colapsos y daños significativos en los municipios vecinos, tanto por los movimientos del terreno como por las olas de tsunami generadas.

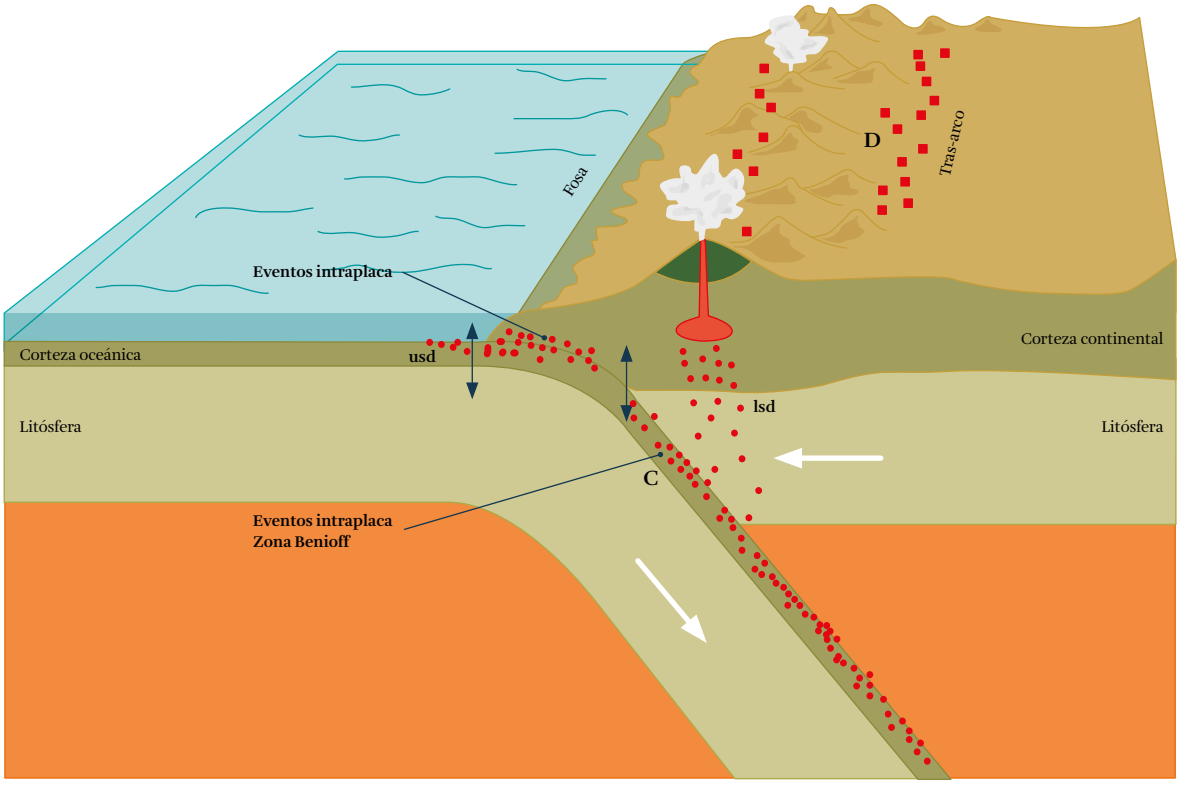



**Figura 34.** Esquema del proceso de subducción
**Fuente:** Tomado y modificado de CSN (s/f)

### 4.1.3 Zona de Benioff

La zona de Benioff es un ambiente tectónico que hace parte del proceso de subducción. Corresponde a la parte de la placa que penetra (subduce) bajo la otra, con una inclinación gobernada por condiciones regionales, con ángulos variables (Sarria, 1995). A los sismos que ocurren dentro del volumen subducido se les denomina *intraplaca* y se asocian a la zona de Benioff. En la figura 34 se presenta un esquema de dicha zona.

En particular, la zona de subducción del Pacífico se desarrolla desde el Pacífico hacia el interior del continente, en un rango de 300 km (véase la figura 35).

En términos generales, para diferenciar los eventos interplaca de los intraplaca (de la zona de Benioff), se consideran, entre otros, los siguientes criterios: la profundidad de los sismos (son más profundos los intraplaca); la localización del arco volcánico, que está relacionada con la zona de Benioff (figura 35); el tipo de mecanismos focales, que en su mayoría son de tipo inverso (*reverse*) en sismos interplaca, mientras que mecanismos compuestos o normales se observan en eventos intraplaca.

Los sismos intraplaca de la zona de Benioff pueden contribuir notablemente a la amenaza de una región. Ejemplos de este tipo de eventos corresponden a los siguientes sismos ocurridos en México: el de 1858 (M ~ 7,7), que tuvo efectos en la Ciudad de México (García *et al.*, 2005); el sismo de 1931 (Mw 7,8), que causó gran destrucción en la ciudad de Oaxaca; el terremoto de 2017 en Puebla y Morelos (Mw 7,1), que causó numerosos colapsos y daños graves en construcciones (Singh *et al.*, 2018). En particular, Singh *et al.* (2018) señalan que, en el caso de Ciudad de México, los registros de los eventos intraplaca de 2017 tuvieron mayores aceleraciones que los registros de eventos interplaca del sismo de 1985 (Mw 8,1) en periodos de vibración menores de 0,6 segundos. En Colombia, sismos de este tipo han ocurrido, entre otros, en los años 1938, 1961, 1962, 1979 y 1995.

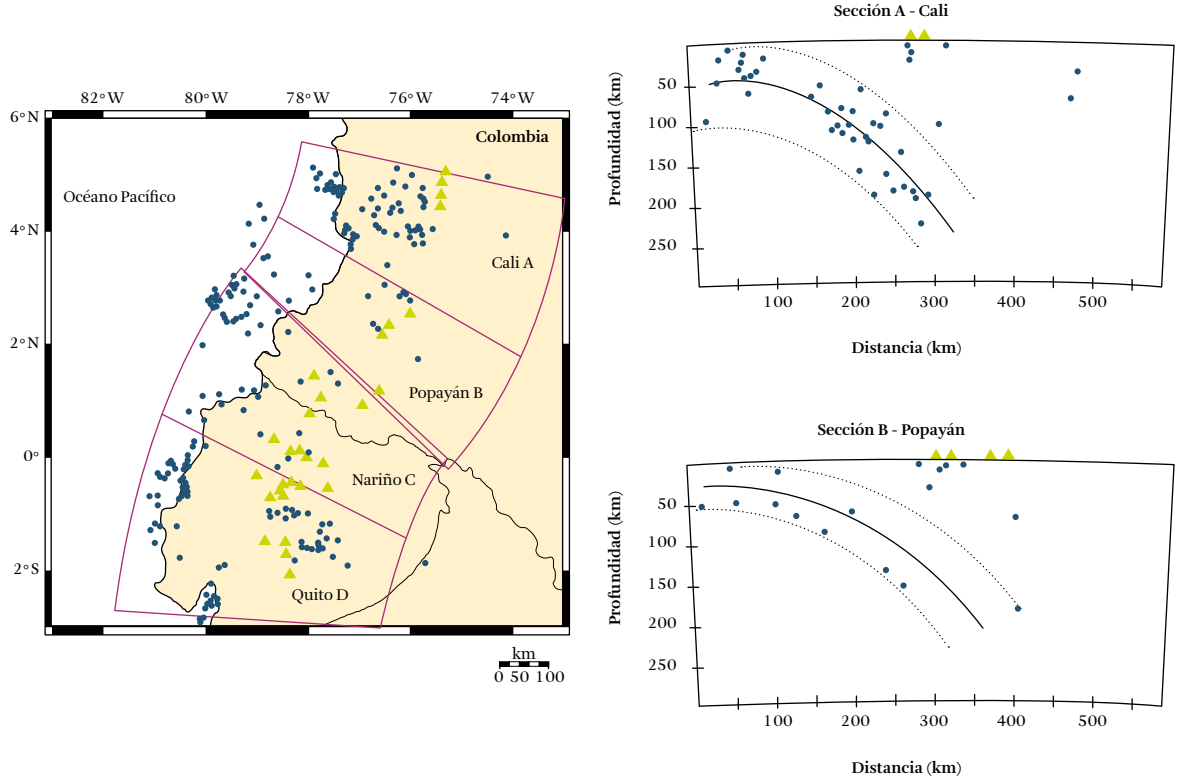



**Figura 35.** Secciones transversales perpendiculares a la trinchera del Pacífico
**Fuente:** Pedraza *et al.* (2007)

### 4.1.4 Sismicidad intraplaca del nido sísmico de Bucaramanga

Un nido sísmico es un volumen de actividad sísmica intensa, persistente en el tiempo y aislado de la actividad de sus alrededores. El nido sísmico de Bucaramanga corresponde a una zona en la que frecuentemente se generan sismos de magnitudes Mw entre 4 y 5, a profundidades de 140 a 200 km (Prieto *et al.*, 2012).

De acuerdo con Schneider *et al.* (1987), el reducido tamaño del nido sísmico de Bucaramanga, la variabilidad de los mecanismos focales identificados y la escasez de sismicidad en los alrededores hacen difícil que se presente una explicación coherente del origen de tal nido.

En Sepúlveda Jaimes y Cabrera Zambrano (2018) se presenta un recuento de diferentes modelos planteados sobre el nido sísmico de Bucaramanga. Los autores resaltan que, debido a la complejidad del proceso, resulta difícil establecer cuál es la placa que subduce: podría ser que la placa Caribe subduce bajo la placa de Suramérica (de acuerdo con Pennington, 1983), o el nido podría estar relacionado con la placa de Nazca, en un segmento denominado bloque de Bucaramanga (según Van der Hilst y Mann, 1994), o estar relacionado con el choque de las placas Nazca y Caribe (según Zarifi *et al.*, 2007).

La figura 36 presenta la localización del nido sísmico de Bucaramanga, así como secciones transversales que permiten identificar la profundidad y ubicación de los sismos correspondientes.

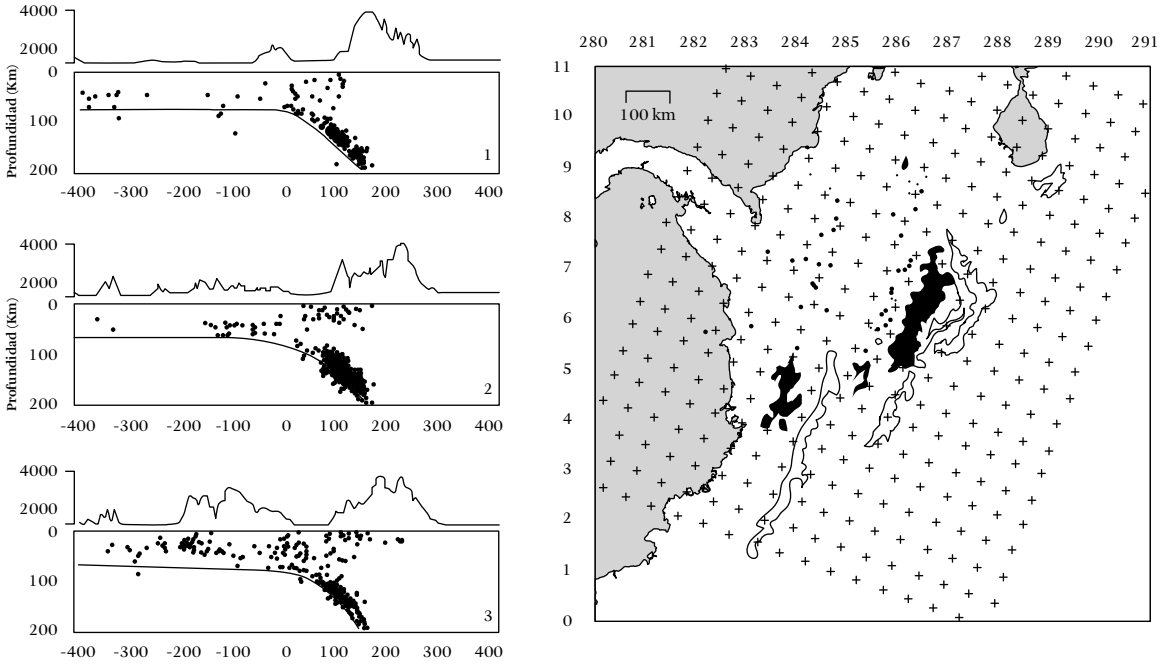



**Figura 36.** Secciones transversales en la localización del nido sísmico de Bucaramanga
**Fuente:** Chiarabba *et al.* (2016)

### 4.1.5 Criterios para la clasificación de sismos según ambientes tectónicos

La clasificación sismotectónica de la sismicidad es un procedimiento relevante para definir las fuentes sísmicas. Con el fin de enfrentar el complejo ambiente sismotectónico del país y realizar una clasificación objetiva, en el presente estudio se adoptó un procedimiento similar a los propuestos por Zhao *et al.* (2015) y García *et al.* (2012), en el cual a cada evento del catálogo se le otorga un ambiente sismotectónico

univoco (cortical, interplaca, Benioff, nido sísmico de Bucaramanga) (figura 37), siguiendo un esquema de clasificación específico.

Dicho esquema de clasificación se determina según la proximidad del hipocentro de los sismos a los límites definidos a priori para cada ambiente tectónico (moho, límite-corteza manto, límite superior e inferior de la subducción, límite último entre la zona interplaca y la zona intraplaca). Los criterios adoptados para clasificar sismos según ambientes tectónicos son los siguientes:

- *Clasificación de eventos corticales.* En este paso se verifica si la profundidad del evento está acotada por el límite corteza-manto superior o moho (figura 33).
- *Clasificación de eventos interplaca e intraplaca.* Los eventos pertenecientes a la zona interplaca son clasificados según su proximidad a los límites geométricos definidos en este modelo (figura 37). Si un evento ya clasificado como cortical se encuentra dentro de los límites del ambiente eventos pertenecientes a la zona intraplaca y del nido de Bucaramanga se sigue un procedimiento similar a la hora de clasificarlos o reclasificarlos.
- *Ajuste y corrección.* A partir de una inspección visual de la clasificación se realiza un ajuste o modificación de la misma, en especial si se trata de eventos históricos o preinstrumentales, de los cuales se cuenta con una pobre definición de la profundidad hipocentral. Entre los ajustes realizados se encuentran los siguientes casos: a) clasificación específica de un conjunto de hipocentros delimitados por un polígono en cierta región (exclusión de sismos volcánicos o inducidos); b) filtrado de eventos de determinado intervalo de magnitud en una ventana temporal específica.

En el presente estudio, eventos con profundidades mayores de 400 km no se clasifican a priori en algún ambiente tectónico; por lo tanto, estos eventos no se utilizan, pues difícilmente generan en superfi-

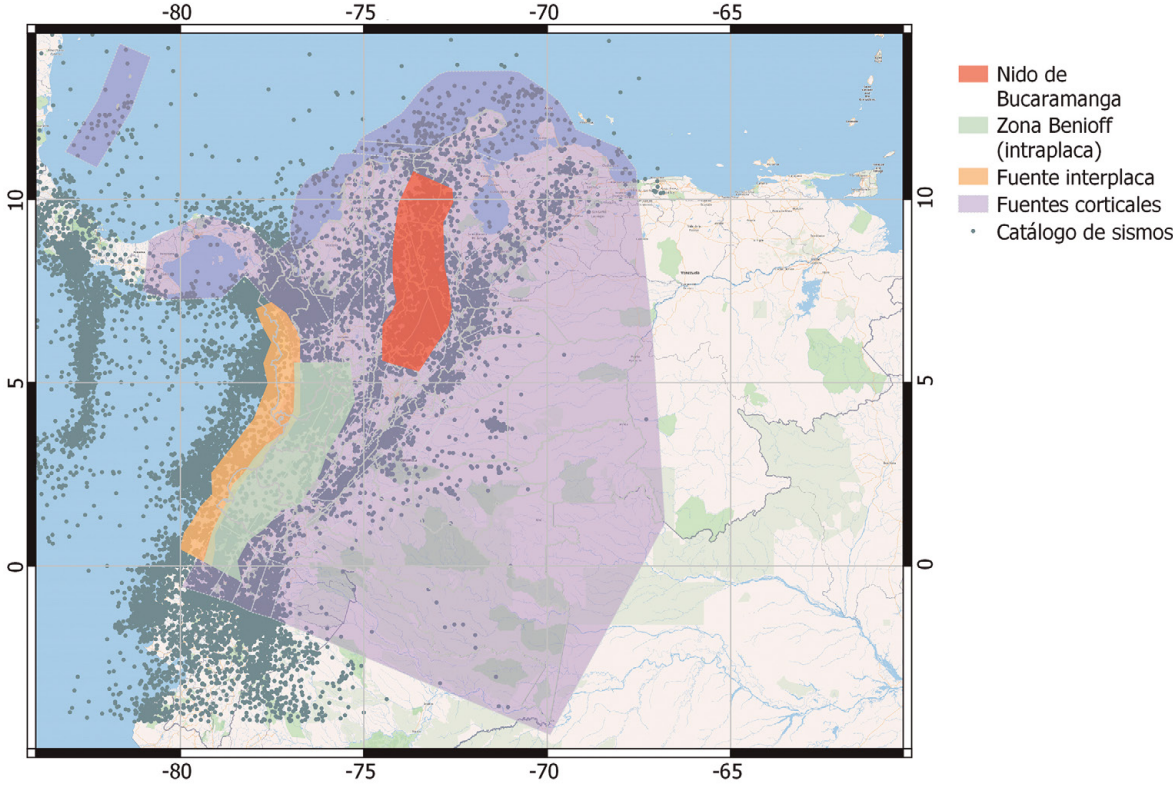



**Figura 37.** Ambientes tectónicos definidos en el modelo
**Nota**: A lo largo del capítulo se presentan detalles de la geometría de las fuentes según ambientes tectónicos.

El proceso de clasificación tectónica de la sismicidad se realizó utilizando la herramienta Subduction Toolkit, que está disponible en el componente Model Building Toolkit del motor de cálculo OpenQuake (GEM ScienceTools - oq-mbtk), que permite implementar los criterios y límites establecidos para cada ambiente tectónico.

Sobre este procedimiento es relevante anotar que tanto la definición de los límites como la localización de los eventos del catálogo constituyen un proceso incierto, razón por la cual durante el proceso de clasificación existe la posibilidad de introducir incertidumbres a la geometría definida de cada límite tectónico.

La tabla 19 presenta los resultados de la clasificación de eventos según modelos de fuentes y ambientes tectónicos. La descripción de los modelos de fuentes (b1 y b2) se presenta en la figura 40.

Se resalta que el esquema de clasificación de sismicidad adoptado se aplicó para determinar el régimen sismotectónico de los eventos de la base de datos de movimientos fuertes presentados en el capítulo 3. La figura 38 presenta resultados de la clasificación tectónica para eventos: a) corticales, b) subducción (interplaca, Benioff) y nido de Bucaramanga.

**Tabla 19.** Clasificación sismo-tectónica de la sismicidad de eventos del catálogo (sin eventos dependientes), según modelos de fuentes

| Ambiente tectónico | N.º eventos (modelo b1) | N.º eventos (modelo b2) |
|---|---|---|
| Cortical | 9.054 | 8.991 |
| Interplaca | 311 | 365 |
| Intraplaca (zona Benioff) | 760 | 790 |
| Profundos (Bucaramanga) | 3.440 | 3.415 |
| Total | 13.565 | 13.561 |

**a)** Eventos corticales

**b)** Eventos de subducción

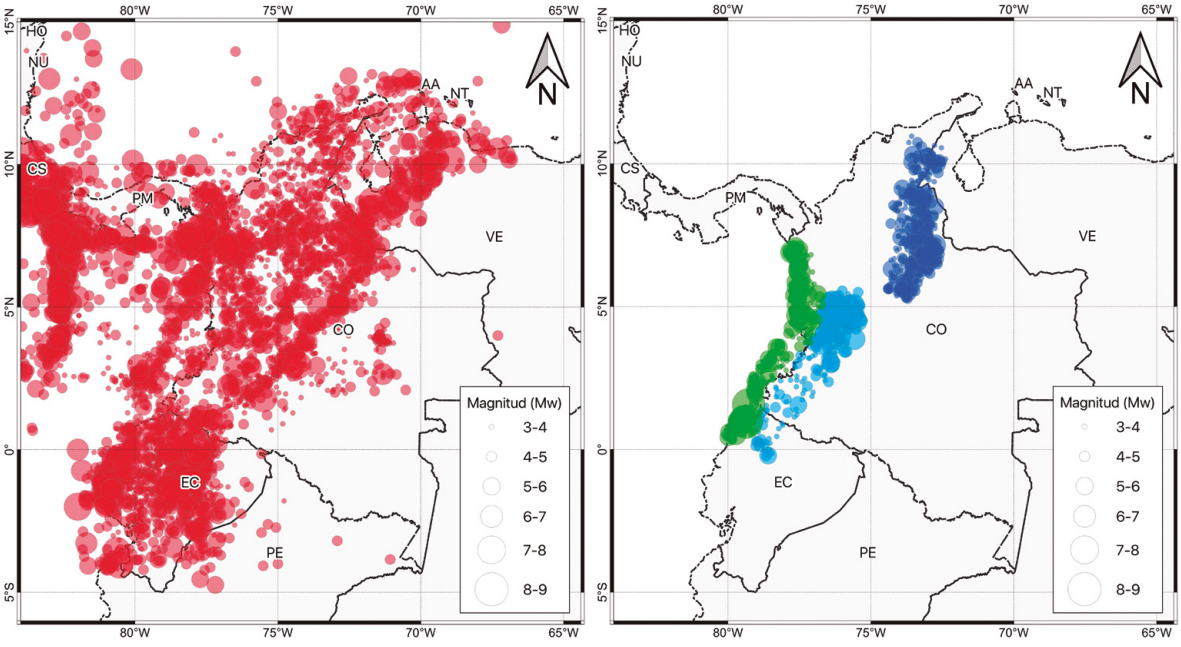



**Figura 38.** Clasificación sismotectónica de los eventos del Catálogo (sin eventos dependientes): a) eventos corticales; b) eventos de subducción y profundos: interplaca (símbolo verde); intraplaca-zona Benioff (símbolo celeste); nido sísmico de Bucaramanga (símbolo azul oscuro)

## 4.2. Árbol lógico de fuentes sísmicas adoptado para Colombia

Partiendo de los logros alcanzados en estudios previos (tales como García *et al.*, 1984; AIS *et al.*, 1996; AIS, 2009), en el presente estudio se proponen las siguientes alternativas (véase la figura 39) para contribuir a una mejor comprensión y modelación de fuentes sísmicas:

- *Fuentes superficiales.* Las fuentes superficiales se modelan considerando dos alternativas: i) fuentes volumétricas tipo área (de sismicidad equiprobable); ii) modelo compuesto por fallas activas y de sismicidad suavizada.
- *Fuentes interplaca en la subducción del Pacífico.* Se consideran dos alternativas de análisis: i) modelo segmentado cuyo límite superior de sismicidad es de 40 km; ii) modelo no segmentado, cuyo límite superior de sismicidad es de 50 km.
- *Fuentes en la zona Benioff (intraplaca).* se consideran dos alternativas de geometría, con límites superiores de sismicidad de 40 y 50 km.
- *Fuentes profundas.* Se considera solo un modelo de fuentes para la sismicidad intraplaca del nido sísmico de Bucaramanga.

Con el fin de armonizar y consolidar los resultados de los diferentes enfoques y tipos de fuentes, en el presente estudio se elaboró un árbol lógico de fuentes sísmicas (figura 40).

Las alternativas propuestas para la modelación de fuentes superficiales buscan atender incertidumbres epistémicas según el tipo de fuente y la distribución de los parámetros de sismicidad. Por otro lado, las alternativas propuestas para las fuentes interplaca y de la zona de Benioff buscan atender incertidumbres asociadas con la geometría de tales fuentes. Del presente análisis se resalta la consideración de variaciones de la profundidad y de los límites que las definen.

Respecto a los pesos asignados a los modelos de fuentes, en el presente estudio se considera que, en fuentes superficiales, la incertidumbre en la caracterización del modelo de fallas activas y de sismicidad suavizada es mayor que la del modelo de sismicidad equiprobable. Por lo tanto, se asigna un menor grado de creencia (un menor peso) al modelo de fallas activas y de sismicidad suavizada.

Por otro lado, para el proceso de subducción del Pacífico, un modelo segmentado de fuentes representa un mayor detalle en la distribución geográfica de los parámetros de sismicidad y, por lo tanto, una descripción más detallada de la amenaza. Por esta razón se asigna un mayor grado de creencia (un mayor peso) al modelo segmentado.

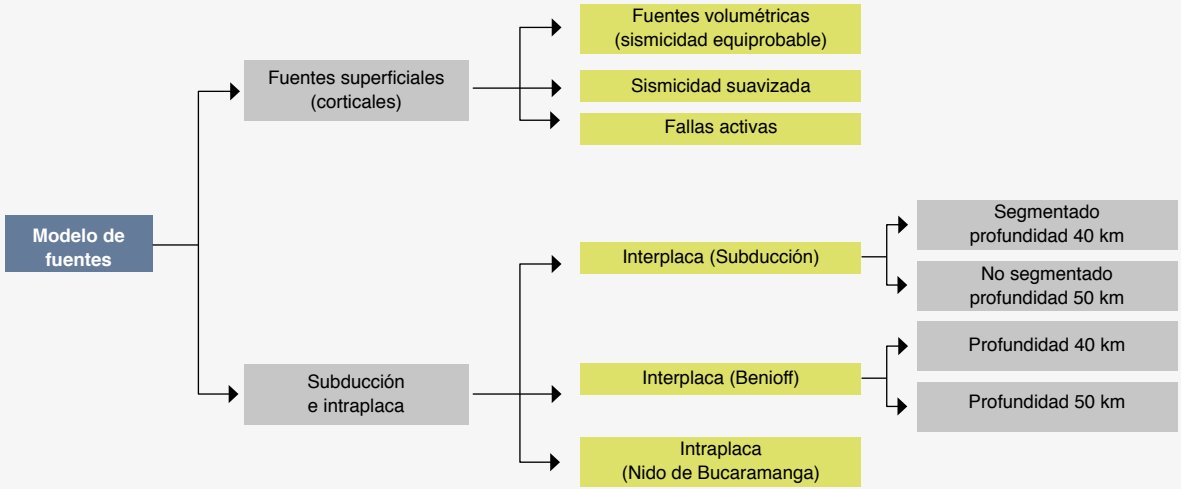



**Figura 39.** Estructura del modelo según profundidad y tipo de fuentes sísmicas

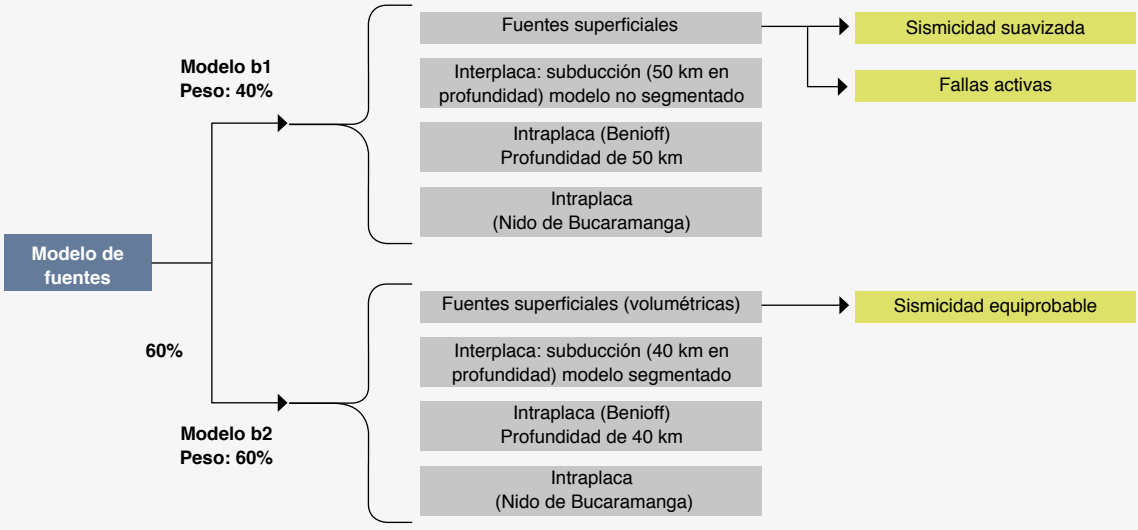



**Figura 40.** Árbol lógico del modelo de fuentes sísmicas adoptado

## 4.3 Modelación de fuentes sísmicas

En las siguientes secciones se presentan detalles sobre la caracterización de las fuentes consideradas en el modelo según ambientes tectónicos, así como de su implementación en el motor de cálculo OpenQuake.

### 4.3.1 Fuentes superficiales tipo área (volumétricas)

Las fuentes tipo área (volumétricas) se adoptan para describir la sismicidad en regiones amplias, cuya sismicidad se considera igualmente distribuida en su interior. Para definir los límites de estas fuentes, en este estudio se consideran parámetros geológicos y tectónicos. Para caracterizar la sismicidad de estas fuentes se utiliza la información contenida en catálogos sísmicos. Mayores detalles sobre estos procedimientos se presentan a continuación.

#### 4.3.1.1 Definición de la geometría de fuentes superficiales tipo área

De acuerdo con Ansari *et al.* (2015), la incertidumbre en los modelos de fuentes sísmicas se debe principalmente a la definición de la geometría de las fuentes, así como a la definición de su sismicidad a partir del catálogo de eventos observados. Esta condición se hace más relevante teniendo en cuenta que los periodos de observación de sismos son relativamente cortos, que se cuenta con información difusa de los sismos y que existen dificultades para la identificación de fallas activas. Ante estas limitaciones, la definición de fuentes sísmicas puede ser subjetiva y estar determinada por el criterio del modelador.

Con el fin de reducir en alguna medida la subjetividad en la definición de la geometría de las fuentes, en el presente estudio se adoptó el procedimiento propuesto por Arcila *et al.* (2017), en el que se utiliza información tectónica, geológica y sismológica con el fin de tener una aproximación a los procesos dinámicos de la corteza terrestre que originan los sismos.

El procedimiento adoptado comprende las siguientes etapas: i) análisis de información geológica y sísmica; ii) georreferenciación de zonas y documentación de criterios; iii) comprobación estadística y parametrización; iv) presentación pública. La figura 41 presenta un esquema de este procedimiento.

La metodología descrita relativa a la definición de la geometría y caracterización de fuentes sísmicas fue aplicada en Colombia en un trabajo conjunto de investigadores del SGC y del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Como resultado se obtuvieron treinta áreas sismogénicas independientes que cubren todo el territorio (figura 42).

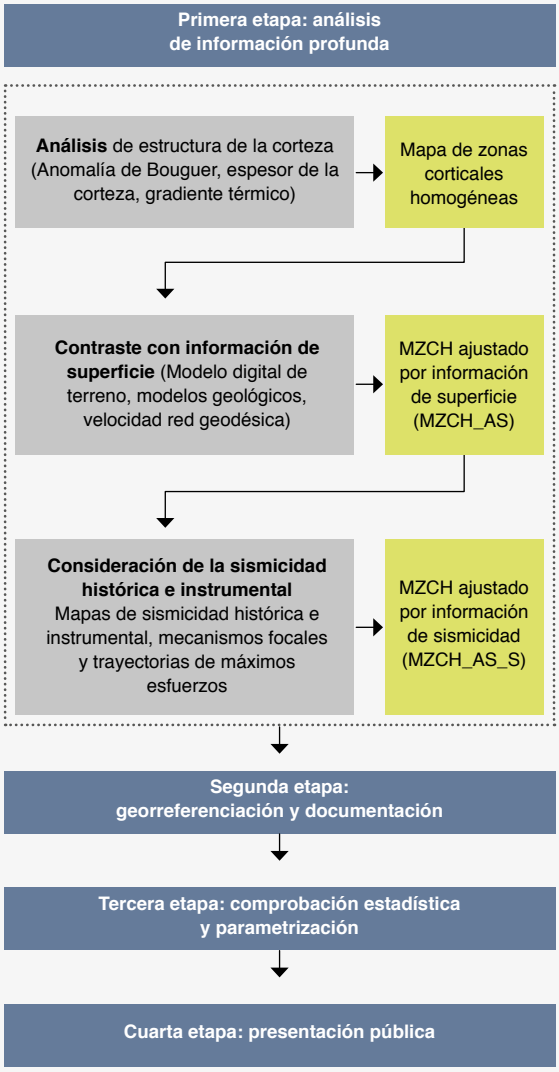



**Figura 41.** Esquema del procedimiento para la definición de la geometría de fuentes sísmicas superficiales

La geometría de tales fuentes se definió mediante polígonos (o volúmenes), delineando regiones con un comportamiento homogéneo de la sismicidad desde un punto de vista espacio-temporal. Sobre el procedimiento adoptado para definir la geometría de fuentes superficiales, se resalta que también puede considerarse una referencia para establecer los límites geométricos de las zonas de subducción.

La tabla 20 presenta un ejemplo de cuadro-resumen de las características, los parámetros obtenidos y los criterios adoptados para caracterizar cada fuente.

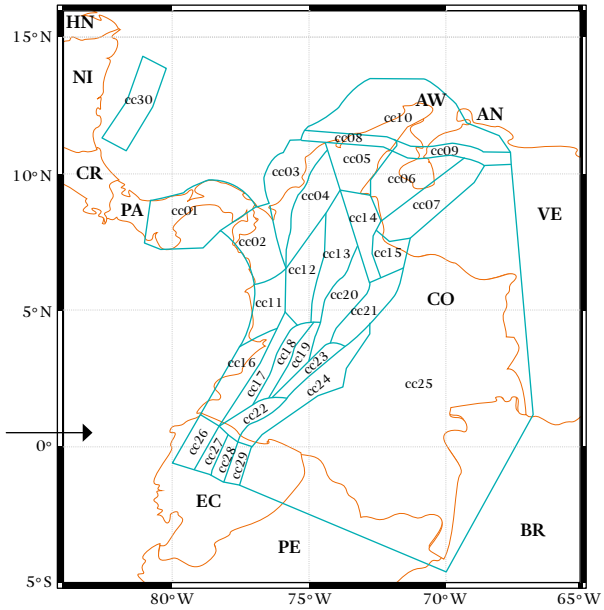



**Figura 42.** Modelo de fuentes corticales tipo área propuesto por el SGC-IGME

**Tabla 20.** Ejemplo de descripción de una zona sismogénica

| Zona | Corteza y esfuerzos | Superficie y fallas activas | Sismicidad | Parámetros sísmicos | Criterios, alternativas y comentarios |
|---|---|---|---|---|---|
| Cordillera Oriental y borde llanero | Corteza continental zengrosada<br>H = 40-50 km<br>GT = datos disponibles poco representativos<br>Shmáx = E-W a NW-SE<br>Régimen: compresivo | Vertiente oriental de la cordillera y franja de los Llanos, donde se infiere continuidad de las estructuras compresivas. Cabalgamientos considerados activos durante el Cuaternario a lo largo del frente montañoso, tanto en el propio borde, Llanos y algunos kilómetros hacia el interior de la cordillera: Sistema de Guaicaramo. Tectónica predominante: cabalgamientos. | Tamaño de la muestra sísmica, aparentemente abundante. Distribución de la muestra bastante homogénea, si bien parece que hacia el NE la densidad de epicentros aumenta. Existen varios registros con I = VII o Mw ≥ 5,5. Uno de 6,7 (1917). Máxima Mw registrada en el CSI = 6,7. Terremotos significativos: 1917, 1995 | λ(4,0) = 3,64<br>b = 0,9<br>Mwmáx = 6,8 ± 0,3<br>Mecanismo de rotura predominante: inverso | Criterio: comprender el frente activo de la cordillera Oriental y su extensión por la franja adyacente del borde llanero. Esta zona presenta un contrastado aumento de sismicidad en relación con el interior de la cordillera y con los Llanos. En cuanto a la corteza, se observa gradiente gravimétrico positivo hacia el interior de los Llanos, que muestra el adelgazamiento de la cadena.<br>Borde NW representado por disminución de la sismicidad y el paso de corteza engrosada a la parte central de la cordillera.<br>Borde SE representado por la disminución de epicentros y de estructuras compresivas cartografiadas, en su paso hacia la corteza adelgazada de los Llanos.<br>Borde S representado por la aparición de la zona de deformación de la falla de Algeciras.<br>Borde N representado por la aparición de estructuras norteadas, deformaciones relacionadas con la zona de falla de Boconó y un aumento relativo de la sismicidad.<br>Alternativas: ¿zona de indentación Boconó y escapes laterales de la cordillera? |

#### 4.3.1.2 Estimación de parámetros de sismicidad para fuentes tipo área

Uno de los principales supuestos del modelo de amenaza sísmica adoptado en el presente estudio es que las rupturas son eventos independientes, de tal manera que la ocurrencia de un sismo no influye en las probabilidades de ocurrencia de otro. Así pues, las tasas de ocurrencia de sismos no varían con el tiempo.

En el presente estudio, la caracterización de la sismicidad de las fuentes tipo área se determina mediante una ley de recurrencia de Gutenberg-Ricther (1954), que considera que los sismos siguen una distribución exponencial. Según esta ley de recurrencia, el número de eventos de magnitudes iguales o superiores a $m$ ($N_m$), en una determinada ventana de observación, puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$Log_{10}(N_m) = a - bm \qquad \text{Ecuación 4.1}$$

Los parámetros a y b de dicha distribución se denominan *parámetros de sismicidad* y pueden estimarse a partir del análisis estadístico del catálogo de eventos (sin eventos dependientes), considerando únicamente los sismos pertenecientes a la fuente de interés.

En términos generales, el parámetro $a$ representa la tasa general de actividad (recurrencia) de eventos en la zona. Por su parte, el parámetro $b$ está relacionado con la sismotectónica de la región y se estima considerando el rango de magnitudes y la magnitud mínima observada en el Catálogo.

Los parámetros $a$ y $b$ fueron obtenidos usando el método de máxima verosimilitud propuesto por Weichert (1980), disponible en la herramienta HMTK (Weatherill, 2014). La figura 43 presenta un ejemplo de la distribución de recurrencia de magnitudes obtenida para la fuente CC_10, que corresponde a la zona norte del departamento de La Guajira.

La tabla 21 presenta un resumen de los parámetros principales de cada una de las fuentes sísmicas. En esta tabla, *Id* representa un identificador de la fuente sísmica; el campo *Nombre* corresponde al nombre de la fuente sísmica, referido a la región geográfica donde la misma está localizada o la componente tectónica predominante (p. ej., Cratón). Por su parte, los campos *a* y *b* representan los parámetros de la distribución magnitud frecuencia. Por último, los campos *Mmín* y *Mmáx* representan la magnitud (Mw) mínima y máxima, respectivamente. En el anexo D se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia de cada fuente.

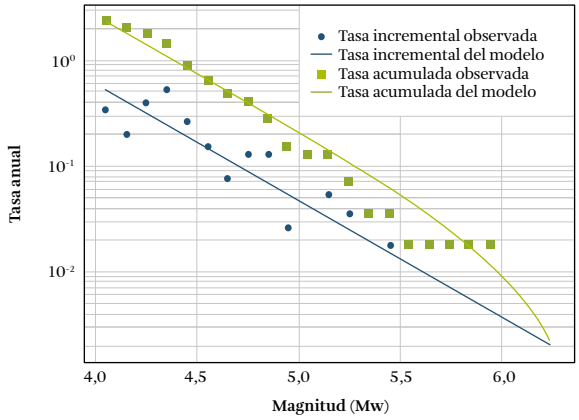



**Figura 43.** Ejemplo de distribución Gutenberg-Richter doblemente truncada

**Tabla 21.** Principales parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas pertenecientes al modelo zonificado de fuentes corticales

| Id | Nombre | a | b | Mmín | Mmáx |
|---|---|---|---|---|---|
| cc01 | Oriente de Panamá | 3,82 | 1,00 | 5,0 | 7,2 |
| cc02 | Pacífico norte (Darién) | 4,62 | 1,00 | 5,0 | 7,4 |
| cc03 | Sabanas costeñas | 3,61 | 0,94 | 5,0 | 6,8 |
| cc04 | Ciénagas del Caribe | 3,45 | 0,83 | 5,0 | 6,5 |
| cc05 | Perijá-Sierra Nevada | 3,48 | 0,92 | 5,0 | 6,5 |
| cc06 | Depresión de Maracaibo | 1,59 | 0,43 | 5,0 | 6,5 |
| cc07 | Andes de Mérida | 4,15 | 0,90 | 5,0 | 7,9 |
| cc08 | Transversal del Caribe (Oca) | 2,75 | 0,80 | 5,0 | 6,7 |
| cc09 | Transversal de Falcón | 3,12 | 0,79 | 5,0 | 6,7 |
| cc10 | Guajira-Paraguaná | 4,78 | 1,10 | 5,0 | 6,7 |
| cc11 | Pacifico central | 4,23 | 1,02 | 5,0 | 6,5 |
| cc12 | Norte de la cordillera Central | 3,66 | 0,92 | 5,0 | 6,5 |
| cc13 | Magdalena medio | 3,35 | 0,78 | 5,0 | 6,5 |
| cc14 | Norte Santander | 4,18 | 1,06 | 5,0 | 6,5 |
| cc15 | Cocuy | 3,72 | 0,86 | 5,0 | 7,5 |
| cc16 | Pacífico sur | 2,82 | 0,74 | 5,0 | 6,8 |
| cc17 | Cauca-Patía | 2,05 | 0,61 | 5,0 | 6,8 |
| cc18 | Central Cordillera Central | 2,55 | 0,70 | 5,0 | 7,1 |
| cc19 | Valle alto del Magdalena | 3,65 | 1,09 | 5,0 | 6,5 |
| cc20 | Altiplano cundiboyacense | 3,14 | 0,83 | 5,0 | 6,8 |
| cc21 | Piedemonte de la Orinoquia | 4,16 | 0,97 | 5,0 | 6,8 |
| cc22 | Zona andina nariñense | 2,63 | 0,69 | 5,0 | 7,0 |
| cc23 | Sur de la cordillera Oriental | 4,75 | 1,17 | 5,0 | 7,0 |
| cc24 | Piedemonte de la Amazonia | 3,76 | 1,03 | 5,0 | 7,4 |
| cc25 | Cratón | 3,55 | 0,93 | 5,0 | 6,6 |
| cc26 | Pacífico ecuatoriano | 5,13 | 1,27 | 5,0 | 7,5 |
| cc27 | Sierra occidental ecuatoriana | 5,66 | 1,34 | 5,0 | 7,6 |
| cc28 | Sierra oriental ecuatoriana | 5,22 | 1,22 | 5,0 | 7,4 |
| cc29 | Piedemonte ecuatoriano | 4,91 | 1,23 | 5,0 | 6,7 |
| cc30 | Zona insular de San Andrés | 1,74 | 0,54 | 5,0 | 6,5 |

#### 4.3.1.3 Modelación de las fuentes tipo área

Para modelar las fuentes tipo área en el motor de cálculo OpenQuake se requieren los siguientes insumos:

- Polígonos que definen los límites de la fuente (véase la sección 4.3.1.1)
- Límites inferiores y superiores de profundidad de ocurrencia de sismos
- Leyes de distribución de frecuencia de magnitudes (véase la sección 4.3.1.2)
- Relaciones de escala de magnitudes y razones de aspecto de la ruptura
- Geometría de las rupturas en términos de los ángulos de rumbo (*strike*), buzamiento (*dip*) y deslizamiento (*rake*)

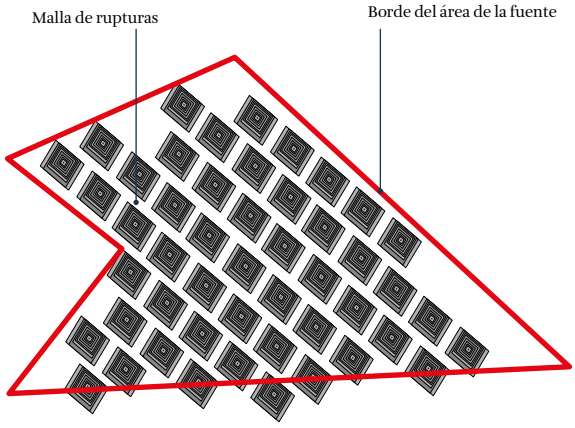



**Figura 44.** Ejemplo de fuentes tipo área
**Fuente:** Pagani *et al.* (2014b)

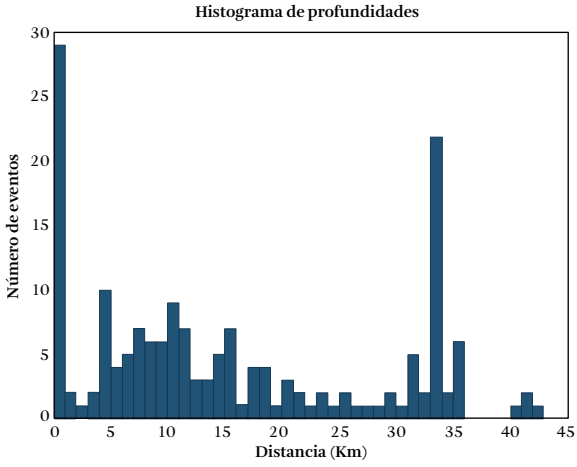



**Figura 45.** Ejemplo de histogramas de eventos en profundidad

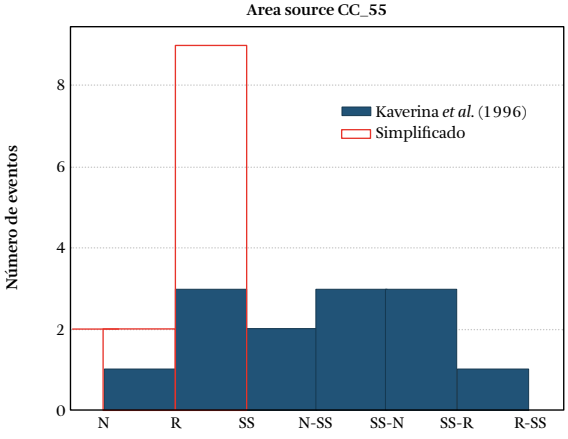



**Figura 46.** Ejemplos de análisis de mecanismos focales y orientación preferencial y cinemática

La figura 44 presenta un ejemplo de modelación de una fuente tipo área en OpenQuake Engine.

A continuación se describen los principales supuestos y consideraciones sobre los parámetros que caracterizan las fuentes tipo área del modelo de fuentes corticales.

- **Magnitud mínima.** Fijada arbitrariamente en Mw = 5.
- **Magnitud máxima.** Obtenida como el valor de magnitud máxima observada (Mw), incrementada en 0,3 unidades de magnitud. Si la magnitud máxima obtenida de una zona es menor que 6,5, la magnitud máxima asignada será 6,5.
- **Espesor sismogenético.** Los límites superior e inferior de la capa sismogénica fueron definidos a partir de un análisis estadístico de la ocurrencia de terremotos instrumentales y la profundidad de la discontinuidad de Mohorovičić.
- **Distribución de eventos en profundidad.** A partir de histogramas de eventos en profundidad, fue definida la probabilidad de ocurrencia de tres profundidades definidas a priori (5, 20 y 35 km). En la figura 45 se presenta un ejemplo de los eventos según los rangos de profundidad.

Sobre la distribución en profundidad, vale la pena resaltar que debido a las limitaciones de los modelos de velocidades utilizados en la localización de los sismos, es posible encontrar picos a profundidades fijadas (tal como se presenta en la figura 45 para 0 y 33 km), que pueden corresponder a soluciones por defecto, en los casos en que no es posible resolver con precisión la localización de los sismos.

a) **Tipo de ruptura predominante y su orientación.** Obtenido a partir del análisis de los mecanismos focales de los eventos, así como de la orientación preferencial y la cinemática de las fallas del área. La figura 46 presenta un ejemplo del análisis de mecanismos focales y de la orientación preferencial, considerando clasificaciones sugeridas por Kaverina *et al.* (1996), así como una clasificación simplificada.

b) **Actividad sísmica.** Representada por una distribución Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter, 1954) doblemente truncada, asumiendo un intervalo de magnitud de 0,1 , + una magnitud mínima (Mw 4) y máxima (variable según la potencialidad de la zona).

Las figuras 47 y 48 presentan los parámetros *a* y *b*, respectivamente, de las fuentes corticales tipo área. De estas figuras se resaltan los siguientes sectores: el sur del departamento de Nariño, en la frontera con Ecuador; el norte del departamento de La Guajira; el borde de la cordillera Oriental, sobre los departamentos del Huila y Meta, así como el noroccidente del departamento del Chocó.

La figura 49 presenta la magnitud máxima asignada a cada fuente. En esta figura se observa que los mayores valores se encuentran al nororiente en la frontera con Venezuela (en zonas de Norte de Santander y Arauca), al noroccidente del departamento de Chocó, en los departamentos de Huila y Meta (sobre la cordillera Oriental), así como al suroccidente, en la frontera con Ecuador.

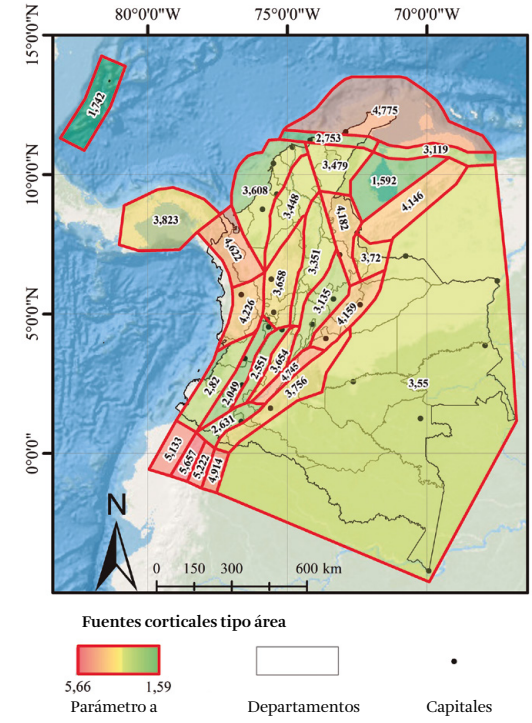



**Figura 47.** Parámetro a: fuentes corticales tipo área

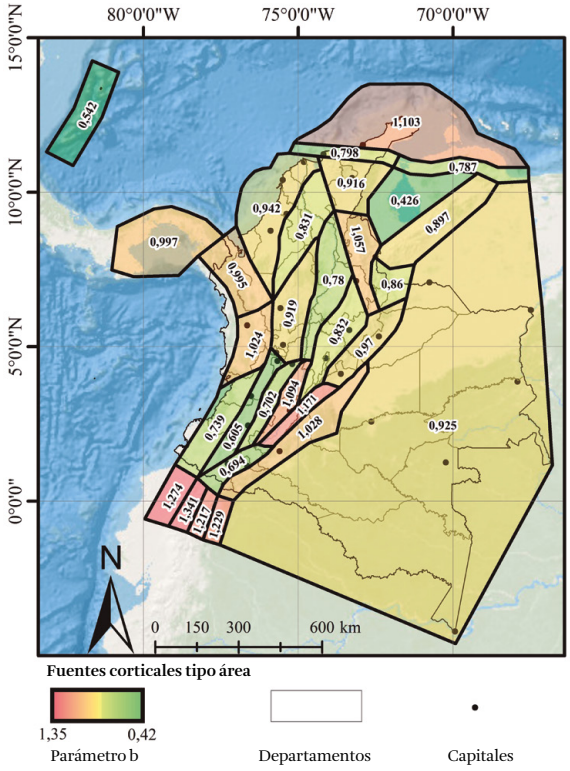



**Figura 48.** Parámetro b: fuentes corticales tipo área

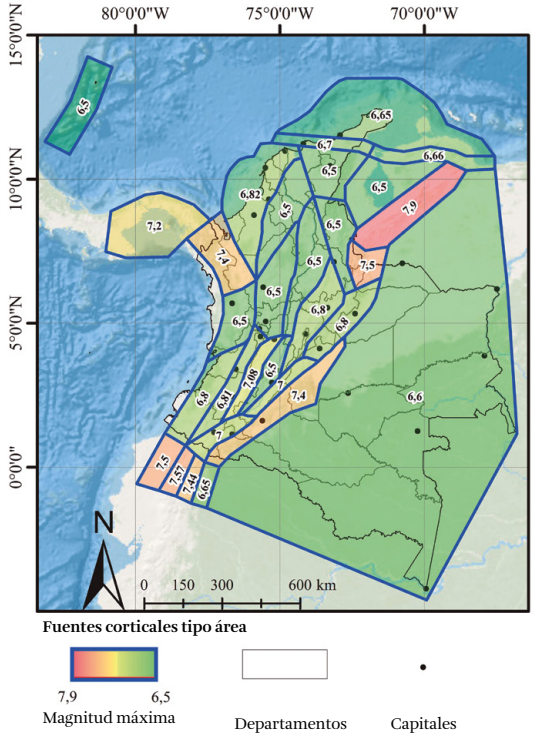



**Figura 49.** Magnitud máxima. Fuentes corticales tipo área

### 4.3.2 Modelo de sismicidad suavizada y de fuentes tipo falla

En este modelo se integra un análisis de sismicidad suavizada con un modelo geotectónico de fallas activas mediante un procedimiento que pretende minimizar un conteo doble de la sismicidad en la región donde las fuentes tipo área/grid y falla se superponen geográficamente.

En la figura 50, los polígonos azules representan macrozonas dentro de las cuales se lleva a cabo un análisis de sismicidad suavizada, con excepción del polígono identificado con el ID c07, en el que se consideró un área fuente como la descrita en la sección 4.3.1. Por otro lado, las líneas rojas son las trazas de las fuentes sísmicas tipo falla activa, mientras que los polígonos anaranjados (fallas 3D) representan la proyección superficial de la falla. A continuación se presentan detalles de la modelación de estos tipos de fuentes.

De las macrozonas definidas se resalta que para la modelación de San Andrés y Providencia se utiliza una fuente idéntica a la establecida en el modelo de sismicidad equiprobable.

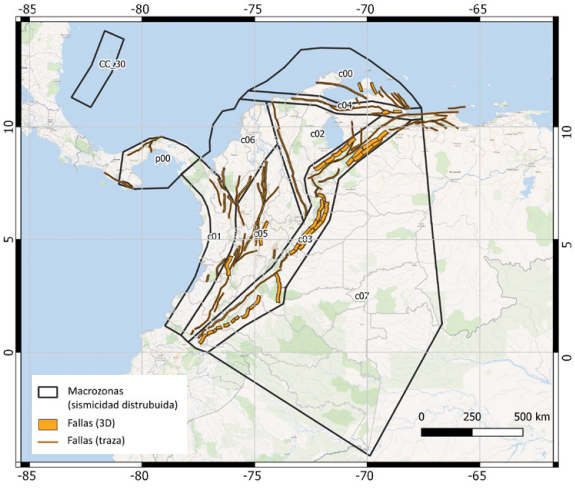



**Figura 50.** Modelo de fuentes corticales considerando fuentes tipo falla y modelos de sismicidad distribuida

#### 4.3.2.1 Modelo de sismicidad suavizada

Teniendo en cuenta que en la construcción de modelos zonificados pueden existir diferentes criterios e incertidumbres en la definición de límites y geometrías de fuentes sísmicas, los modelos de sismicidad suavizada representan una alternativa basada principalmente en catálogos de eventos. Con este enfoque se establece una malla regular para realizar, en cada celda, un conteo de eventos de magnitudes iguales o superiores a determinados rangos de magnitudes, considerando intervalos de 0,1 Mw.

Estos valores son posteriormente ajustados para obtener valores suavizados en el territorio, y son usados para estimar, de cada sitio de interés, tasas anuales de ocurrencia de sismos a ciertas distancias y magnitudes. Detalles de la estimación de la amenaza sísmica con modelos suavizados se encuentran en Frankel (1995) y Woo (1996). En Monelli *et al.* (2014) se presentan procesos de implementación de este análisis en el motor de cálculo OpenQuake.

Con este modelo se definieron y caracterizaron nueve macrozonas de ambiente sismo-tectónico similar. La caracterización de las macrozonas se realiza del mismo modo que con el modelo de fuentes tipo área (véase la figura 51). La tabla 22 presenta un resumen de los parámetros principales de cada una de las macrozonas consideradas en el modelo suavizado. En el anexo E se presentan -las distribuciones de magnitud-frecuencia en cada una de ellas.

De cada macrozona se establece un subcatálogo de eventos principales. A la vez, se definen fuentes puntuales distribuidas en una malla equiespaciada de 0,1° en cada una de las macrozonas.

La transformación del modelo tipo área a tipo fuente puntual (tipo kernel suavizado) se realiza aplicando un filtro gaussiano al subcatálogo de sismos principales de cada una de las macrozonas. Posteriormente se calcula la fracción de la tasa de ocurrencia total que puede ser referida espacialmente al nodo/localización donde se encuentra cada fuente puntual.

En una determinada fuente puntual, la tasa de ocurrencia está condicionada por la distribución de magnitud-frecuencia obtenida de la macrozona, y comparte el mismo valor de *b* y tasas de ocurrencia producto del filtraje espacial gaussiano.

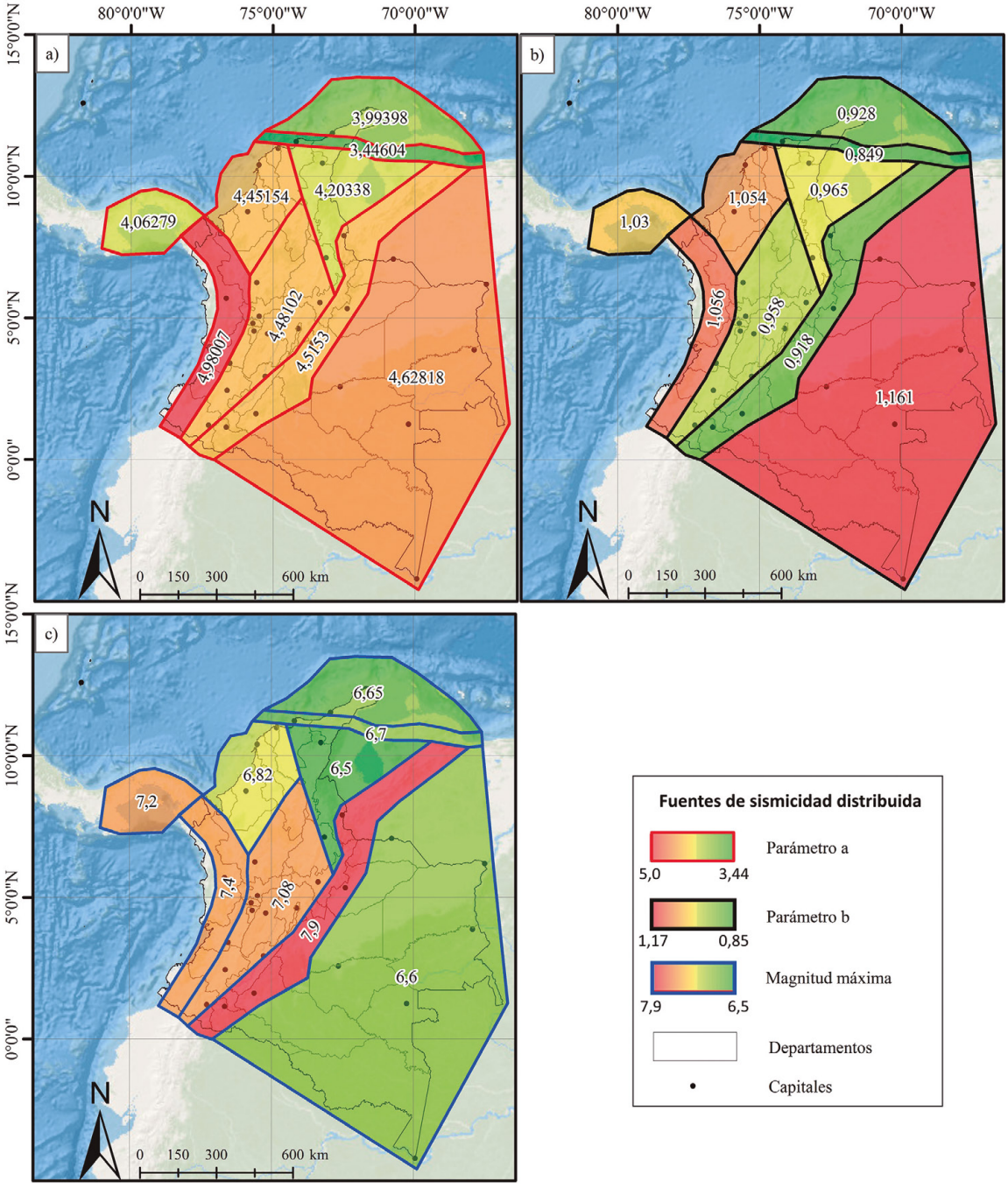



**Figura 51.** Parámetros de sismicidad de macrozonas consideradas en el modelo de sismicidad suavizada

**Tabla 22**. Parámetros principales de las macrozonas consideradas en el modelo de sismicidad distribuida (tipo Kernel)

| Id | Nombre | a | b | Mmín | Mmáx |
|---|---|---|---|---|---|
| p00 | Panamá | 4,06 | 1,03 | 5,0 | 7,2 |
| c00 | Guajira-Paraguaná | 3,99 | 0,93 | 5,0 | 6,7 |
| c01 | Pacífica | 4,98 | 1,06 | 5,0 | 7,4 |

(…/…)

| Id | Nombre | a | b | Mmín | Mmáx |
|---|---|---|---|---|---|
| c04 | Oca-Falcón | 3,45 | 0,85 | 5,0 | 6,7 |
| c06 | Caribe | 4,45 | 1,05 | 5,0 | 6,8 |
| c05 | Andina | 4,48 | 0,96 | 5,0 | 7,1 |
| c02 | Nororiental | 4,20 | 0,97 | 5,0 | 6,5 |
| c03 | Piedemonte oriental | 4,52 | 0,92 | 5,0 | 7,9 |
| c07 | Cratón | 4,63 | 1,16 | 5,0 | 6,6 |
| cc30 | San Andrés | 1,74 | 0,54 | 5,0 | 6,5 |

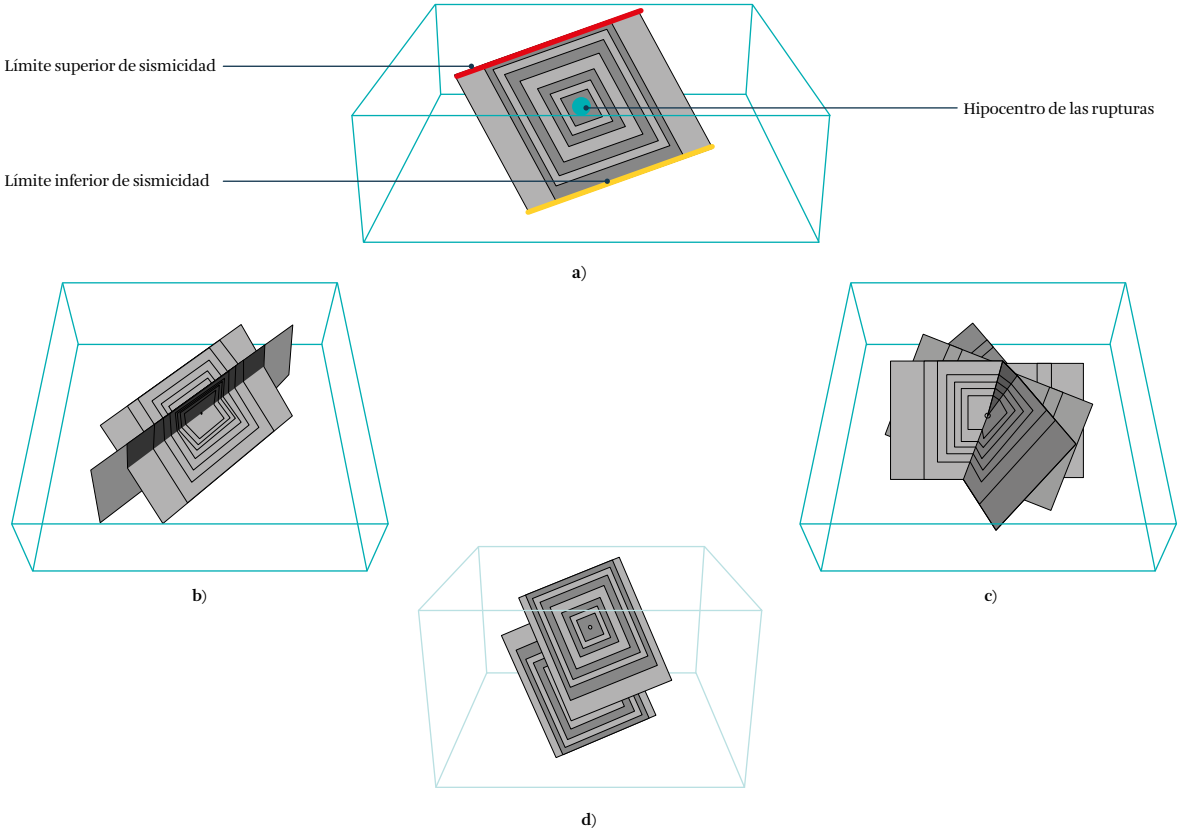



**Figura 52.** Ejemplo de fuentes puntuales. **a)** Diferencias según relaciones de escala y de aspecto. **b)** Diferencias según buzamiento. **c)** Rumbo. **d)** Profundidades hipocentrales
**Fuente:** tomado y modificado de Pagani *et al.* (2014b)

Para elaborar el modelo de sismicidad suavizada se utilizaron herramientas creadas por la fundación GEM para este propósito, con las que se obtuvo un conjunto de fuentes puntuales. Estas fuentes se definen a partir de las coordenadas del punto, los límites inferiores y superiores de profundidad de ocurrencia de sismos, relaciones de escala de magnitudes, razones de aspecto de la ruptura, tasas de ocurrencia de eventos según magnitudes y la geometría de las rupturas, descrita en términos de los ángulos de rumbo (*strike*), buzamiento (*dip*) y deslizamiento (*rake*). La figura 52 presenta un esquema de las fuentes puntuales modeladas en el motor de cálculo OpenQuake.

Al comparar los parámetros de las macrozonas (véase la figura 51) con los parámetros asignados a las áreas fuente del modelo de sismicidad equiprobable (véanse las figuras 47, 48 y 49), se observa que las ma-

crozonas adoptan valores cercanos a los máximos de las áreas fuente que abarcan.

Por ejemplo, el modelo de sismicidad equiprobable correspondiente a la costa pacífica tiene fuentes con magnitudes máximas de 7,4 Mw en el norte de Chocó (ID CC02, tabla 21) y de 7,5 Mw en el sur de Nariño (ID CC26, tabla 21). En el modelo de sismicidad distribuida, el Pacífico está representado en una macrozona (ID C01, tabla 22) cuya magnitud máxima es 7,4. De esta manera, los parámetros de las macrozonas pueden representar una mayor sismicidad. Estos valores se armonizaron con la actividad sísmica de fallas activas, tal como se describe en la siguiente sección.

#### 4.3.2.2 Caracterización de fallas activas

Las fallas activas fueron determinadas a partir de un enfoque geotectónico. De esta manera, para caracterizar la actividad sísmica de estas fuentes no se utiliza información del Catálogo Sísmico Integrado.

En la modelación de fuentes tipo falla se supone que los eventos ocurren en el entorno de la misma. Ante limitaciones en el conocimiento de la geometría (en superficie y en profundidad), se optó por un tipo de falla simple (según la nomenclatura del motor de cálculo OpenQuake), que se describe a partir de los siguientes parámetros: traza de la falla en superficie; una distribución de frecuencia de magnitudes; una relación de escala de magnitudes; geometría de las rupturas en términos de los ángulos de rumbo (*strike*), buzamiento (*dip*) y deslizamiento (*rake*), y límites superior e inferior de la profundidad de la capa sismoactiva.

En el motor de cálculo OpenQuake, las rupturas se obtienen al trasladar la traza de la falla (en superficie) al límite inferior de profundidad de las rupturas con una inclinación acorde con el ángulo de buzamiento y azimut. En este tipo de fuente, los límites inferior y superior delimitan la región donde pueden ocurrir rupturas en la falla (Pagani *et al.*, 2014b). La figura 53 presenta un ejemplo de la fuente tipo falla con ruptura flotante, de acuerdo con la modelación realizada en OpenQuake.

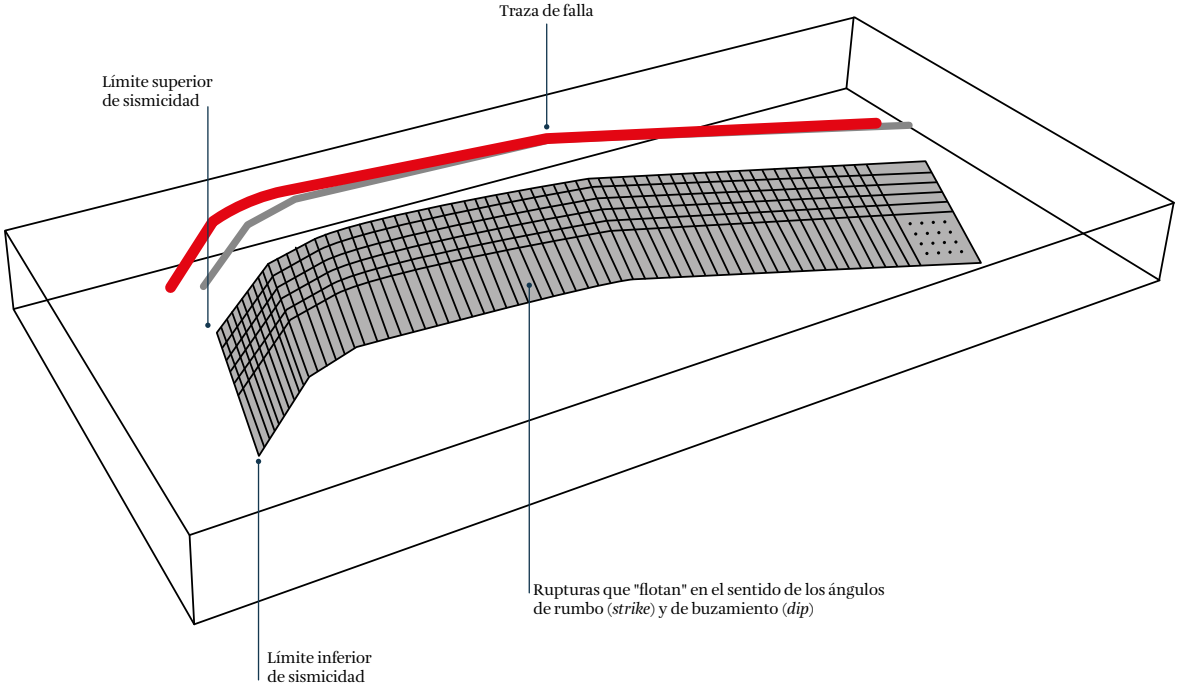



**Figura 53.** Ejemplo de fuente tipo falla con rupturas flotantes
**Fuente:** tomado y modificado de Pagani *et al.* (2014b)

A continuación se presentan los parámetros adoptados para la definición de las fallas activas:

a) **Magnitud mínima**. Fijada en Mw = 6,5, asumiendo que solo en eventos con esta magnitud, o mayores, es posible reconocer que la ruptura llega a la superficie.

b) **Magnitud máxima**. Obtenida usando los parámetros geométricos que caracterizan la falla (o segmento de ella) y la función de escala propuesta por Leonard (2010). Si la magnitud máxima obtenida es inferior a la magnitud mínima, la falla no viene considerada como fuente sísmica.

c) **Función de escala entre la magnitud y el área de ruptura**. Leonard (2010).

d) **Espesor sismogenético**. El límite superior es fijado arbitrariamente en 0 km de profundidad, suponiendo que las rupturas en eventos con Mw ≥ 6,5 son reconocidas en la superficie. El límite inferior varía según las dimensiones de la falla (o segmento de ella considerado) y su cinemática (véanse detalles en Leonard, 2010).

e) **Actividad sísmica**. Representada por una distribución Gutenberg-Richter doblemente truncada, asumiendo un intervalo de magnitud 0,1, una magnitud mínima (Mw 6,5) y máxima obtenida, como se explicó.

En este caso, la actividad sísmica se calcula usando la información geológica y cinemática contenida en la base de fallas activas, y no de forma directa del Catálogo Símico Integrado, como en el caso de las fuentes tipo área o de sismicidad distribuida.

Para analizar la actividad sísmica se utiliza la metodología propuesta por Anderson y Luco (1983), que supone posible encontrar un balance entre la productividad de la falla (número de terremotos promedio entre la magnitud mínima y máxima) y la tasa de liberación de momento total, representado por la tasa de deslizamiento anual.

El valor del parámetro *b* se fijó a priori como el valor obtenido en la macrozona (fuente tipo área) a la que pertenece la falla. Por otro lado, el valor del parámetro *a* se ajustó de modo que la tasa de liberación de momento total equivale a la tasa de acumulación del momento sísmico. El modelo de recurrencia considerado fue el exponencial propuesto por Youngs y Coppersmith (1985).

La figura 54 y la figura 55 presentan ejemplos de distribuciones de recurrencia de magnitudes de fallas pertenecientes a las macrozonas C02 y C03, respectivamente. En estas figuras, las líneas rojas punteadas corresponden a la distribución de recurrencia de magnitudes de la macrozona; las líneas amarillas, a las distribuciones individuales de cada falla, y la azul corresponde a la suma de las distribuciones de las fallas.

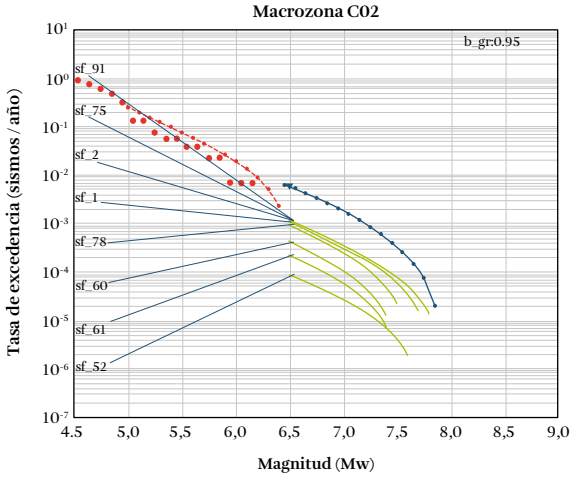



**Figura 54.** Distribución de recurrencia de magnitudes en las fallas activas de la macro zona C02

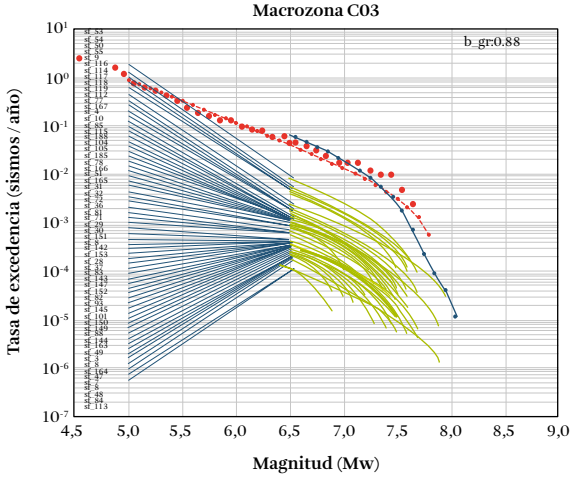



**Figura 55.** Distribución de recurrencia de magnitudes de fallas activas de la macro zona C03

En la figura 54 se observa que la distribución de magnitudes de la macrozona C02 tiene una magnitud máxima de 6,5 Mw. Dicha distribución se complementa con la suma de las distribuciones de magnitudes de las fallas, de tal manera que se puede tener una evaluación de la amenaza sísmica en un rango de magnitudes superiores a 6,5 Mw.

En la figura 55 se observa que la macrozona C03 tiene una distribución de magnitudes con magnitud máxima superior a 7,5 Mw. En esta figura se observa un buen ajuste entre la distribución de magnitudes de la macrozona y la suma de distribuciones individuales de fallas pertenecientes a dicha macrozona.

La tabla 23 presenta un resumen de los parámetros principales de cada una de las fallas consideradas en el modelo. El campo *Id* corresponde al identificador de la falla, o segmento de ella; los campos *Usd* y *Lsd* representan los límites superior e inferior de la capa sismoactiva, respectivamente; el campo *Dip* corresponde al ángulo de buzamiento promedio de la falla, o segmento de ella; el campo *Rake* corresponde al ángulo de deslizamiento promedio de la falla, o segmento de ella, y el campo *Slip* corresponde a la tasa anual de desplazamiento (en mm/año).

**Tabla 23.** Parámetros principales de las fuentes sísmicas tipo fallas simples, pertenecientes al modelo cortical

| Id | Nombre | Usd | Lsd | Dip | Rake | Slip |
|---|---|---|---|---|---|---|
| sf_192 | Azuero Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 4,500 |
| sf_194 | Azuero Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 4,500 |
| sf_195 | Azuero Fault Zone | 0 | 17 | 80 | –45 | 0,900 |
| sf_199 | Rio Gatun Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 7,200 |
| sf_200 | Limón Fault | 0 | 17 | 80 | –135 | 1,640 |
| sf_240 | Pedro Miguel Fault | 0 | 17 | 90 | 180 | 4,500 |
| sf_241 | Río Gatún Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 4,500 |
| sf_242 | Río Gatún Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 4,500 |
| sf_243 | Río Gatún Fault | 0 | 17 | 90 | 0 | 4,500 |
| sf_287 | La Victoria-El Horno | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_288 | La Victoria-La Cabrera | 0 | 16 | 90 | 180 | 0,900 |
| sf_289 | Tácata-Tácata | 0 | 16 | 72 | 180 | 0,400 |
| sf_290 | Aragüita-Aragüita | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,400 |
| sf_291 | San Sebastián-Centro | 0 | 17 | 90 | 180 | 2,700 |
| sf_293 | Tacagua-El Ávila-El Ávila | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,400 |
| sf_294 | Tuñame-Norte | 0 | 19 | 72 | –90 | 0,450 |
| sf_295 | Boconó-Lagunillas-Los Mirtos | 0 | 17 | 90 | 180 | 4,500 |
| sf_296 | Lagarto-Lagarto | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,180 |
| sf_297 | Los Médanos-Los Médanos | 0 | 17 | 60 | –90 | 0,180 |
| sf_298 | La Soledad-La Soledad | 0 | 17 | 90 | –135 | 0,270 |
| sf_299 | Costa NE de Falcón-Este | 0 | 17 | 90 | –135 | 0,270 |
| sf_301 | Oca-Ancón-Ancón | 0 | 17 | 90 | 180 | 1,350 |
| sf_302 | Oca-Ancón-Camare-Paraíso 2 | 0 | 17 | 90 | 135 | 1,800 |
| sf_303 | Oca-Ancón-Socremo | 0 | 16 | 52 | 135 | 0,900 |
| sf_304 | Flanco Norandino-Suroeste | 0 | 10 | 30 | 90 | 0,180 |
| sf_305 | Flanco Surandino-Sur 2 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0,450 |
| sf_306 | Burbusay-Burbusay | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,900 |
| sf_307 | Boconó-Santa Cruz de Mora-Los Frailes | 0 | 17 | 90 | 180 | 5,400 |
| sf_308 | Boconó-Cabudare-Morón | 0 | 16 | 72 | 135 | 0,900 |
| sf_309 | La Victoria-Guacamaya Este | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_310 | Valera-Norte 1 | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,450 |
| sf_311 | Valera-río Momboy | 0 | 18 | 90 | –45 | 0,450 |
| sf_318 | Siquisique-Siquisique | 0 | 17 | 90 | 135 | 0,630 |
| sf_319 | Río Seco-Este | 0 | 16 | 72 | 135 | 0,320 |
| sf_325 | La Victoria-La Victoria | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_327 | Río Guárico-Sur | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,300 |
| sf_328 | Río Guárico-Centro | 0 | 15 | 90 | 180 | 0,300 |
| sf_329 | Boconó-Boconó-Palo Colorado | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,900 |
| sf_331 | Costa NE de Falcón-Oeste | 0 | 17 | 90 | –135 | 0,270 |
| sf_332 | Oca-Ancón-Churuguara | 0 | 17 | 90 | –135 | 1,800 |

(…/…)

| Id | Nombre | Usd | Lsd | Dip | Rake | Slip |
|---|---|---|---|---|---|---|
| sf_333 | Flanco Surandino-Norte 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0,230 |
| sf_334 | Boconó-Mucuchíes-Anzoátegui | 0 | 17 | 90 | 180 | 8,100 |
| sf_335 | La Victoria-Guacamaya Oeste | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_336 | Costa NE de Falcón-Costa Oriental Falcón | 0 | 17 | 90 | –135 | 0,270 |
| sf_340 | Moroturo-Moroturo | 0 | 10 | 30 | 90 | 0,180 |
| sf_343 | La Victoria-Pichao | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,500 |
| sf_345 | Paraguaná Oeste-Paraguaná Oeste | 0 | 17 | 60 | –90 | 0,180 |
| sf_346 | Oca-Ancón-Oca Este | 0 | 17 | 90 | 135 | 0,450 |
| sf_347 | Flanco Norandino-Noreste | 0 | 10 | 30 | 90 | 0,230 |
| sf_348 | Boconó-Anzoátegui-Barquisimeto | 0 | 17 | 90 | 180 | 4,500 |
| sf_349 | Valera-Páramo Miranda | 0 | 20 | 90 | –45 | 0,450 |
| sf_351 | Río Seco-Centro | 0 | 16 | 72 | 135 | 0,320 |
| sf_352 | Murri | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,090 |
| sf_353 | Cubara | 0 | 14 | 45 | 90 | 0,900 |
| sf_355 | Sección Yopal A | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,130 |
| sf_356 | Bucaramanga | 0 | 16 | 72 | 45 | 0,900 |
| sf_357 | Tucura | 0 | 19 | 72 | 90 | 0,450 |
| sf_358 | Mutatá | 0 | 16 | 72 | 45 | 0,450 |
| sf_360 | Jetudo | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,090 |
| sf_361 | El Reposo-El Reposo | 0 | 17 | 90 | 45 | 0,270 |
| sf_362 | Espíritu Santo | 0 | 19 | 72 | –135 | 0,450 |
| sf_363 | Cañas Gordas | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,450 |
| sf_365 | Flanco Surandino-Sur 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0,450 |
| sf_366 | La Tortuga-La Tortuga | 0 | 17 | 90 | 180 | 1,000 |
| sf_367 | Costa NE de Falcón-Centro | 0 | 17 | 90 | –135 | 0,270 |
| sf_368 | Oca-Ancón-Camare-Paraíso 1 | 0 | 17 | 90 | 135 | 1,800 |
| sf_369 | Caparo-Oeste | 0 | 16 | 72 | 180 | 0,900 |
| sf_370 | Valera-Norte 2 | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,900 |
| sf_373 | Murindó | 0 | 17 | 90 | 45 | 0,450 |
| sf_374 | Cubará | 0 | 11 | 45 | 90 | 0,900 |
| sf_375 | Honda | 0 | 16 | 52 | 45 | 0,090 |
| sf_376 | Santa Marta | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,900 |
| sf_377 | Sección Guaicaramo Norte | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,440 |
| sf_378 | Sección Guaicaramo Central | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,440 |
| sf_379 | Sección Guaicaramo Sur | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,440 |
| sf_380 | Urrao | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,450 |
| sf_383 | Oca Oeste | 0 | 16 | 72 | 135 | 2,250 |
| sf_384 | Río Seco-Oeste | 0 | 16 | 72 | 135 | 0,320 |
| sf_385 | Falla de Algarrobo | 0 | 16 | 72 | 0 | 0,900 |
| sf_387 | Santa Bárbara | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,090 |
| sf_388 | Sopetrán | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,180 |
| sf_389 | San Jerónimo | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,090 |
| sf_390 | Sabanalarga | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,090 |
| sf_391 | Sabanalarga | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,090 |
| sf_392 | Cimitarra | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,180 |
| sf_393 | Aguas Calientes S | 0 | 15 | 72 | 135 | 0,450 |
| sf_394 | Sección Yopal B | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,130 |
| sf_395 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_396 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_397 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_398 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_399 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_400 | Aguas Calientes N | 0 | 14 | 72 | 135 | 0,450 |
| sf_401 | Otú-Norte | 0 | 16 | 72 | 45 | 0,450 |
| sf_402 | Bagre-Norte | 0 | 16 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_403 | Oca-Ancón-Oca Centro | 0 | 17 | 90 | 135 | 0,410 |
| sf_404 | Usme | 0 | 19 | 72 | –135 | 0,900 |
| sf_405 | Guayuriba | 0 | 16 | 72 | 135 | 1,350 |
| sf_406 | La Macarena | 0 | 14 | 45 | 90 | 0,090 |
| sf_407 | San Juan de Villalobos-Yunguillo | 0 | 19 | 72 | 135 | 1,800 |
| sf_408 | Sibundoy-La Cocha | 0 | 15 | 90 | 180 | 1,800 |
| sf_409 | Altamira-Pitalito | 0 | 19 | 72 | 135 | 1,800 |

(…/…)

| Id | Nombre | Usd | Lsd | Dip | Rake | Slip |
|---|---|---|---|---|---|---|
| sf_410 | Algeciras-Balsillas | 0 | 17 | 90 | 180 | 1,800 |
| sf_411 | Zuluaga-Garzón | 0 | 17 | 90 | 180 | 1,800 |
| sf_412 | Afiladores | 0 | 19 | 72 | 135 | 1,800 |
| sf_413 | Guachucal Norte | 0 | 13 | 72 | 135 | 0,900 |
| sf_415 | Guachucal Centro | 0 | 13 | 72 | 135 | 0,900 |
| sf_416 | Buesaco-Aranda | 0 | 17 | 90 | 180 | 1,800 |
| sf_417 | La Cruz | 0 | 15 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_418 | San Pablo | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_419 | San Pablo | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_420 | Corinto | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_421 | Buenavista | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_422 | San Sebastián | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_423 | Sotará | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_424 | El Tambor | 0 | 19 | 72 | 135 | 0,450 |
| sf_425 | Dagua Calima | 0 | 16 | 72 | –45 | 0,450 |
| sf_426 | Saliente de Buga | 0 | 12 | 37 | 90 | 0,270 |
| sf_427 | Ibagué | 0 | 17 | 90 | 180 | 1,350 |
| sf_428 | Montenegro | 0 | 16 | 72 | –45 | 0,450 |
| sf_429 | Pijao | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_430 | Armenia | 0 | 19 | 72 | –45 | 0,450 |
| sf_432 | Campanario | 0 | 17 | 90 | 180 | 0,450 |
| sf_433 | Aranzazu-Manizales | 0 | 14 | 90 | 0 | 0,090 |
| sf_435 | Borde Amazónico | 0 | 14 | 45 | 90 | 0,450 |
| sf_436 | Borde Amazónico | 0 | 14 | 45 | 90 | 0,450 |
| sf_437 | Borde Amazónico | 0 | 11 | 45 | 90 | 0,450 |
| sf_438 | Borde Amazónico | 0 | 13 | 45 | 90 | 0,450 |
| sf_440 | Borde Amazónico | 0 | 13 | 45 | 90 | 0,450 |
| sf_442 | Borde Amazónico | 0 | 11 | 45 | 90 | 0,450 |
| sf_443 | Borde Amazónico | 0 | 12 | 45 | 90 | 0,450 |
| sf_444 | Borde Amazónico | 0 | 14 | 45 | 90 | 0,450 |
| sf_445 | Borde Amazónico | 0 | 13 | 45 | 90 | 0,450 |
| sf_446 | Borde Amazónico | 0 | 14 | 45 | 90 | 0,450 |
| sf_464 | Flanco Surandino-Norte 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0,230 |
| sf_465 | Flanco Norandino-Noreste | 0 | 10 | 30 | 90 | 0,230 |
| sf_466 | Sección Yopal A | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,130 |
| sf_467 | Sección Yopal A | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,130 |
| sf_468 | Sección Guaicaramo Norte | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,440 |
| sf_469 | Sección Guaicaramo Central | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,440 |
| sf_470 | Tucura | 0 | 19 | 72 | 90 | 0,450 |
| sf_471 | Espíritu Santo | 0 | 19 | 72 | –135 | 0,450 |
| sf_472 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_473 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_474 | Cimitarra | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,180 |
| sf_475 | Otú-Norte | 0 | 16 | 72 | 45 | 0,450 |
| sf_476 | Bagre-Norte | 0 | 16 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_477 | Honda | 0 | 16 | 52 | 45 | 0,090 |
| sf_478 | Honda | 0 | 16 | 52 | 45 | 0,090 |
| sf_479 | Jetudo | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,090 |
| sf_480 | Jetudo | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,090 |
| sf_482 | Aranzazu-Manizales | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,090 |
| sf_483 | Aranzazu-Manizales | 0 | 17 | 90 | 0 | 0,090 |
| sf_484 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_485 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_486 | Sección Yopal B | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,130 |
| sf_492 | San Sebastián-Centro | 0 | 17 | 90 | 180 | 3,000 |
| sf_529 | Murrí | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,090 |
| sf_530 | Falla de Algarrobo | 0 | 16 | 72 | 0 | 0,900 |
| sf_531 | Bucaramanga | 0 | 16 | 72 | 45 | 0,900 |
| sf_532 | Flanco Norandino-Noreste | 0 | 10 | 30 | 90 | 0,230 |
| sf_534 | Sección Guaicaramo Central | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,440 |
| sf_535 | Flanco Surandino-Norte 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0,230 |
| sf_536 | Flanco Surandino-Sur 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0,450 |
| sf_537 | Flanco Norandino-Noreste | 0 | 10 | 30 | 90 | 0,230 |

(…/…)

| Id | Nombre | Usd | Lsd | Dip | Rake | Slip |
|---|---|---|---|---|---|---|
| sf_538 | Flanco Surandino-Norte 1 | 0 | 7 | 20 | 90 | 0,230 |
| sf_539 | Boconó-Anzoátegui-Barquisimeto | 0 | 17 | 90 | 180 | 4,500 |
| sf_540 | Sección Guaicaramo Central | 0 | 12 | 37 | 90 | 1,440 |
| sf_541 | Palestina | 0 | 19 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_542 | Palestina | 0 | 14 | 72 | 45 | 0,180 |
| sf_543 | Espíritu Santo | 0 | 19 | 72 | –135 | 0,450 |

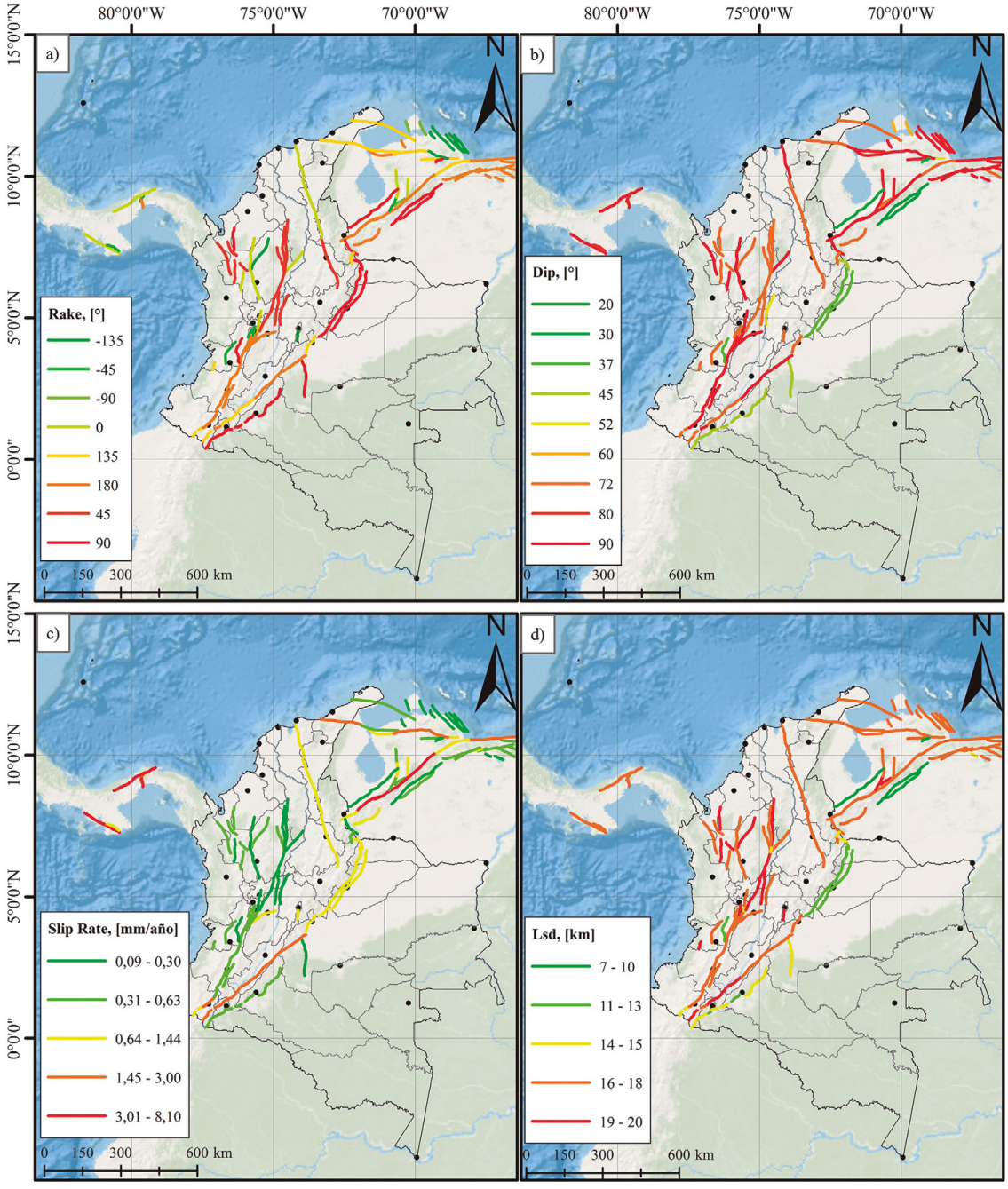



**Figura 56.** Parámetros para caracterizar fallas activas

En la figura 56 se presenta la distribución geográfica de las fallas activas incluyendo los parámetros de la tabla 23. En el anexo F se incluyen las distribuciones de magnitud-frecuencia de cada falla.

#### 4.3.2.3 Integración del modelo de sismicidad suavizada y de fallas

La integración del modelo de fuentes puntuales (o sismicidad distribuida tipo kernel) y las fuentes tipo fallas simples es un paso necesario para evitar un doble conteo de la sismicidad en el entorno geográfico donde ambos modelos se superponen.

Para reducir este efecto, una alternativa de integración consiste en cortar las distribuciones de recurrencia de magnitudes de las fuentes puntuales, considerando como límite máximo la magnitud mínima de la distribución de recurrencia de magnitudes que describe las fallas activas (Pagani *et al.*, 2016; García *et al.*, 2017). De esta manera se obtiene un empalme de curvas de recurrencia de magnitudes que restringe el doble conteo de sismos.

### 4.3.3 Modelación de fuentes de subducción y profundas

Generalmente, la modelación de la actividad sísmica en zonas de subducción involucra dos tipologías de fuentes: fuentes en la zona de contacto entre las placas (denominadas *interplaca*) y fuentes intraplaca en la zona de Benioff (denominadas *intraplaca*, *intra-slab* o *inslab*).

Las fuentes tipo interplaca, como su nombre lo indica, representan la sismicidad producida en el contacto entre las placas involucradas en el proceso de subducción, en la zona de mayor acoplamiento entre ellas. Por su parte, las fuentes intraplaca representan la sismicidad que ocurre dentro del volumen que subduce, así como en su entorno (figura 34).

Las fuentes de subducción se definieron y caracterizaron a partir de las experiencias regionales en Suramérica y el Caribe, tales como los proyectos South America Risk Assessment (SARA) (García *et al.*, 2017) y Central America Risk Assessment (CCARA), liderados por la Fundación GEM, que contaron con la participación de investigadores locales.

Por otra parte, se consideraron experiencias del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), de Heuret *et al.* (2011) y de Heuret *et al.* (2015), respecto a la definición de la geometría de la subducción, la tipología de fuentes, la estimación de parámetros de sismicidad y la segmentación de las fuentes (García *et al.*, 2017).

Para la modelación de las fuentes de subducción se adoptó el siguiente procedimiento:

- Definición de la geometría de la placa subducida utilizando un modelo 2,5D, con el que se busca representar en una superficie 2D el volumen de la placa 3D.
- Subdivisión geométrica de la placa subducida en zona de interplaca, Benioff y profunda (nido de Bucaramanga).
- Selección de eventos de cada una de las fuentes (según tipología) y caracterización sísmica.
- Implementación de las fuentes en el motor de cálculo OpenQuake.

En las siguientes secciones se presentan detalles de cada uno de estos pasos.

#### 4.3.3.1 Definición de la geometría de la placa subducida

La definición de la geometría de la placa subducida es el primer paso, y uno de los más importantes, en la caracterización de estas fuentes. Para este propósito se define un número de secciones a lo largo de la trinchera, y perpendiculares a la zona de Benioff, donde la placa de Nazca se introduce debajo de la placa de Suramérica. El principal objetivo es caracterizar, desde un punto sismotectónico, la distribución de eventos en profundidad en cada perfil y obtener una geometría generalizada de la placa en términos de los límites superior e inferior, cambios en la orientación y profundidad, así como criterios válidos para una posible segmentación.

La figura 57 presenta las secciones utilizadas para a) la región colombo-ecuatoriana y b) el nido sísmico de Bucaramanga. El número de secciones que deben construirse a lo largo de la trinchera, o perfil geográ-

fico tomado como referencia, se definió a partir de la densidad de la información usada en el análisis y su resolución en profundidad a lo largo de cada una de las secciones. También se tuvo en cuenta que dicha información no fuera redundante y que permitiera la inferencia de la geometría de la placa subducida.

La figura 58 presenta ejemplos de secciones creadas para caracterizar el proceso de subducción entre las placas Nazca y Suramérica. De forma similar, la figura 59 presenta secciones para caracterizar la sismicidad profunda del nido de Bucaramanga. A partir de estos perfiles y de la distribución de hipocentros de sismos a lo largo de éstos, es posible identificar la profundidad indicativa del límite superior de la placa subducida (línea negra discontinua).

A la vez, en estas secciones se incluyen clasificaciones de los mecanismos de ruptura (según Kaverina *et al.*, 1996), que también permiten realizar una diferenciación de las zonas interplaca (mayoritariamente de tipo inverso o *reverse*) y Benioff, en las cuales la mayoría de eventos son de tipo normal y *strike slip*.

Los análisis realizados en cada perfil se integraron en un modelo 2,5D, de lo que se obtuvo una superficie que representa el límite superior de la placa subducida. Las figuras 60 y 61 presentan las superficies obtenidas de la subducción colombo-ecuatoriana, así como la obtenida del nido sísmico de Bucaramanga, respectivamente. Mediante este modelo también se obtiene una aproximación a la geometría de la placa subducida y a sus variaciones en profundidad.

Por otro lado, el límite inferior de la placa subducida se define utilizando la información contenida en los perfiles y el conocimiento acumulado en estudios sobre el proceso de subducción en el Pacífico colombiano (Pedraza García *et al.*, 2007; Chiarabba *et al.*, 2016).

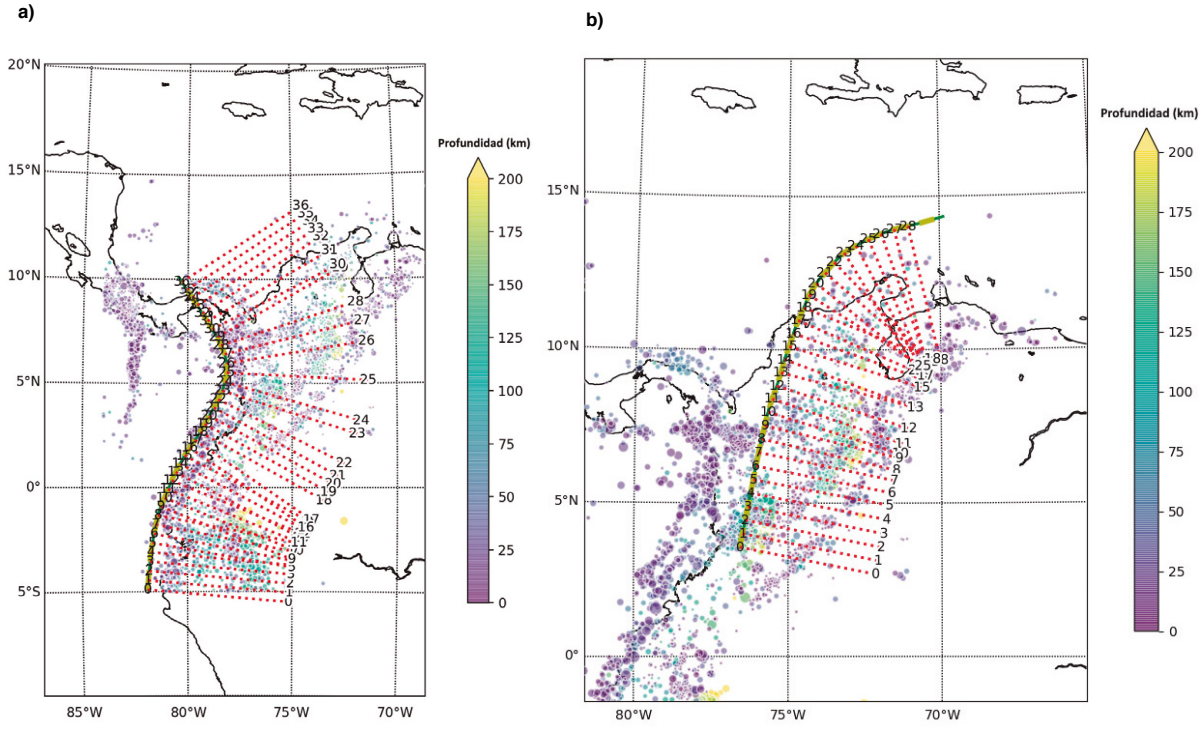



**Figura 57.** Mapas con las secciones creadas para para definir la geometría de **a)** subducción Nazca/Suramérica y **b)** sismicidad profunda (Bucaramanga). La escala representa la profundidad de los eventos presentes en el Catálogo

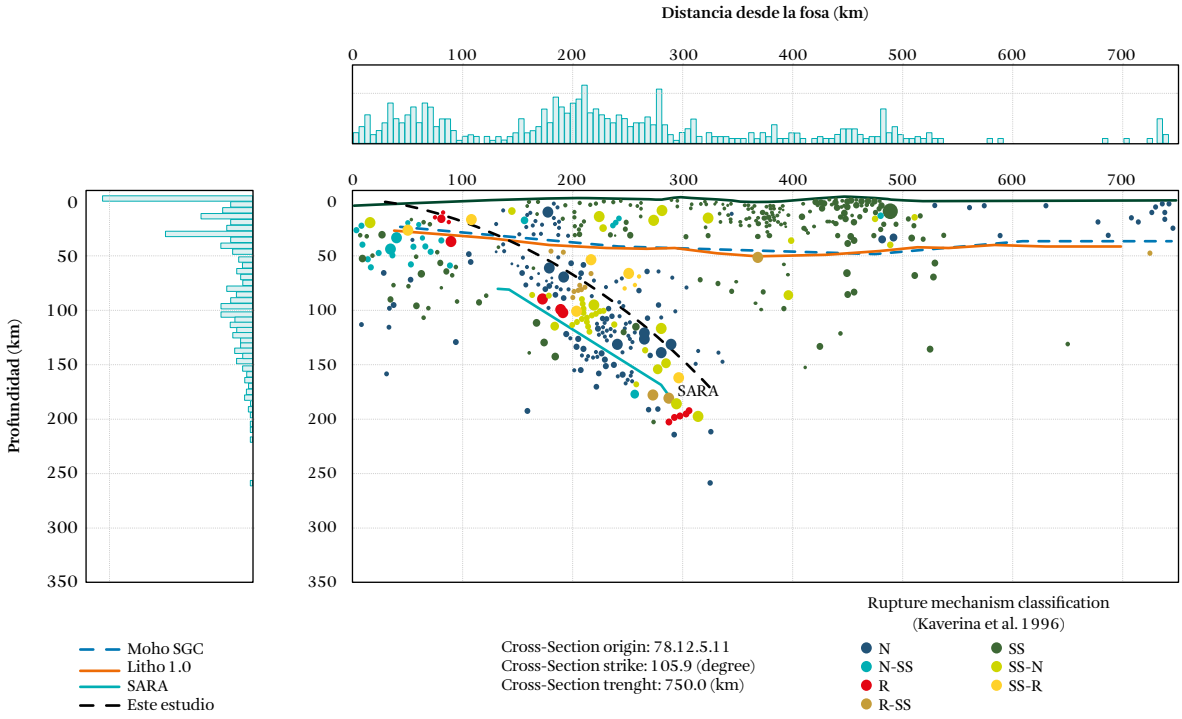



**Figura 58.** Ejemplo de secciones creadas para para definir la geometría del proceso de subducción entre las placas Nazca y Suramérica

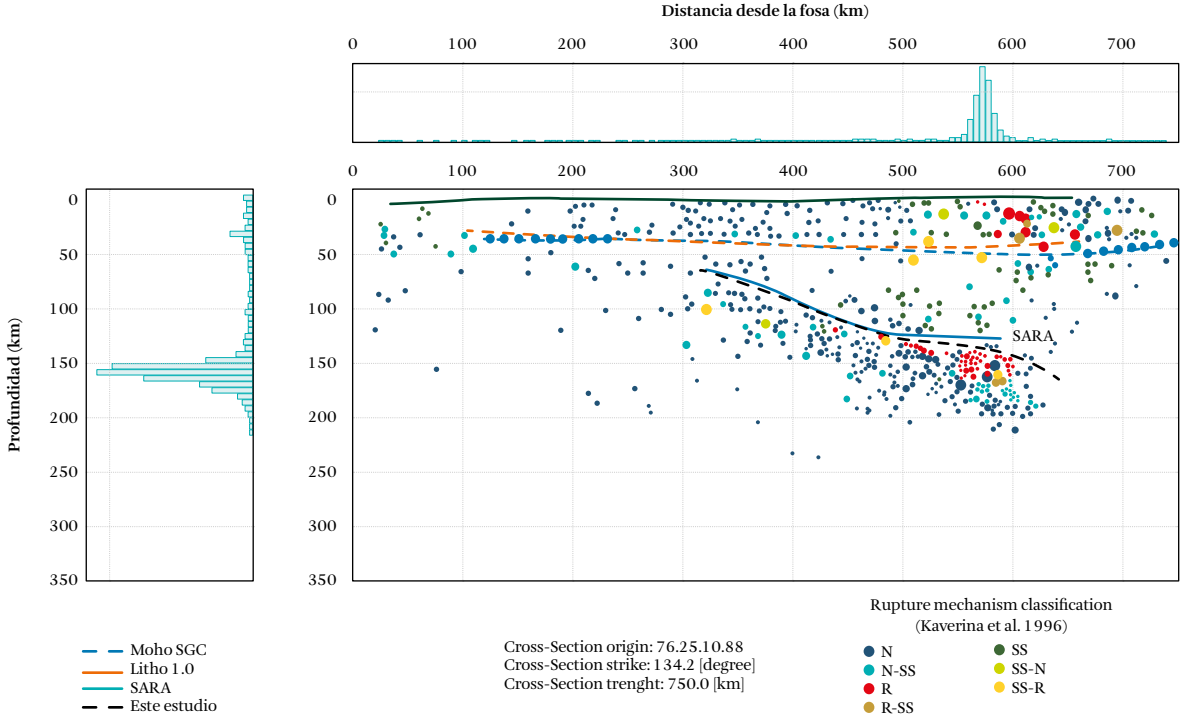



**Figura 59.** Ejemplo de secciones creadas para para definir la geometría de la sismicidad del nido de Bucaramanga

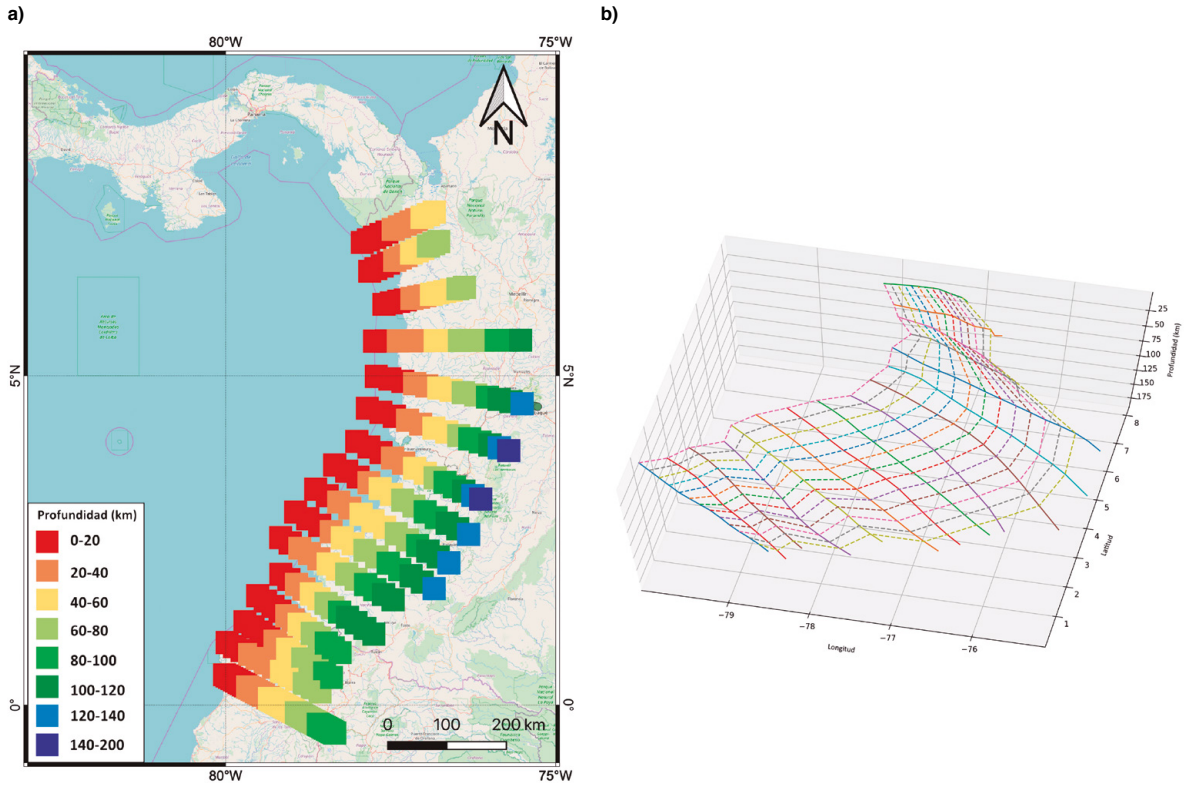



**Figura 60.** Tope del volumen de subducción entre las placas Nazca y Suramérica en la región colombo-ecuatoriana: **a)** variaciones en profundidad; **b)** superficie 2,5D obtenida

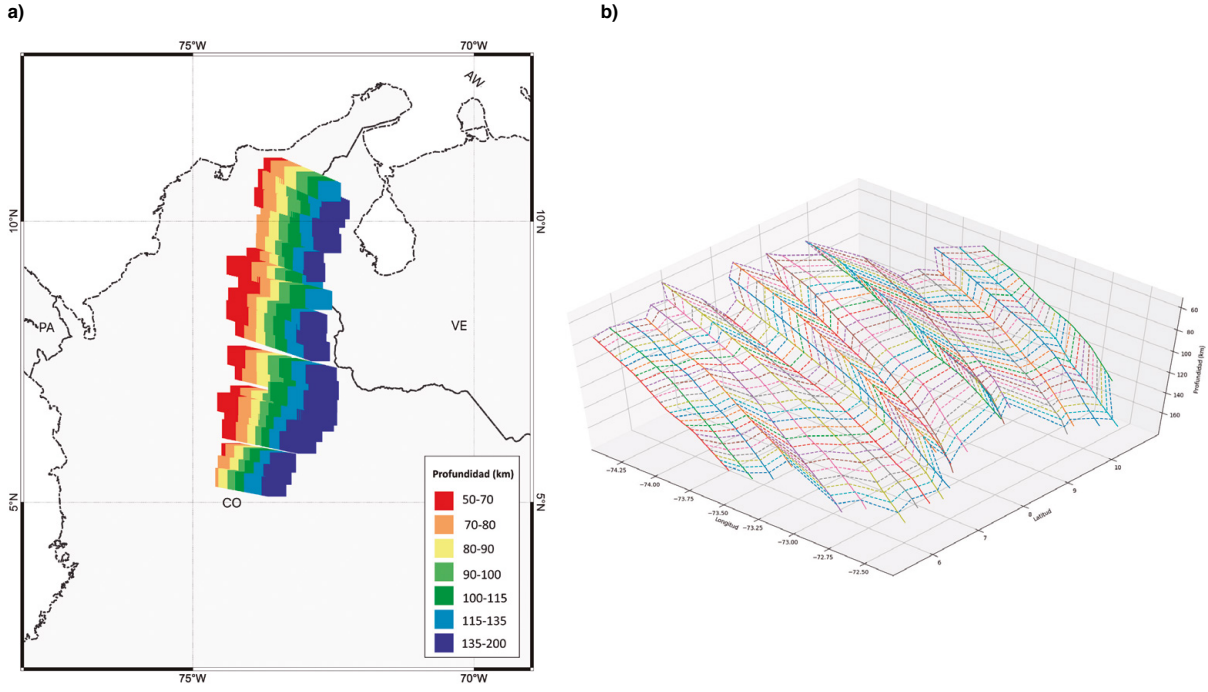



**Figura 61.** Tope del volumen subducido en la región del nido sísmico de Bucaramanga (sismicidad profunda): **a)** variaciones en profundidad; **b)** superficie 2,5D obtenida

#### 4.3.3.2 Subdivisión geométrica de la placa subducida en zonas interplaca y Benioff

Para el análisis de amenaza, además de conocer la geometría de la placa subducida, es necesario discriminar dicha placa en zonas interplaca e intraplaca, ya que en esas zonas se generan rupturas de diferentes características (mecanismos focales, magnitudes y profundidades).

En el caso de las fuentes interplaca, se asume que los eventos ocurren en la superficie del tope de la placa subducida, o en su entorno, si se consideran incertidumbres asociadas a su definición. De esta manera, es relevante definir las profundidades superior (*usd*) e inferior (*lsd*) de la zona interplaca, así como la variación de la profundidad en la dirección del buzamiento promedio del proceso de subducción (figura 34).

Como referencia, la figura 62 presenta rangos de profundidades de las fuentes interplaca pertenecientes a los modelos de amenaza compilados en la base de datos de la Fundación GEM (versión 2017): RES12 (Benito *et al.*, 2012 para Centroamérica); SOA10 (Petersen *et al.*, 2010 para Suramérica) y SAR16 (García *et al.*, 2017), proyecto SARA para Suramérica. En esta figura se observa que se han utilizado profundidades de 10 a 15 km (líneas punteadas) para establecer el límite superior de la zona interplaca.

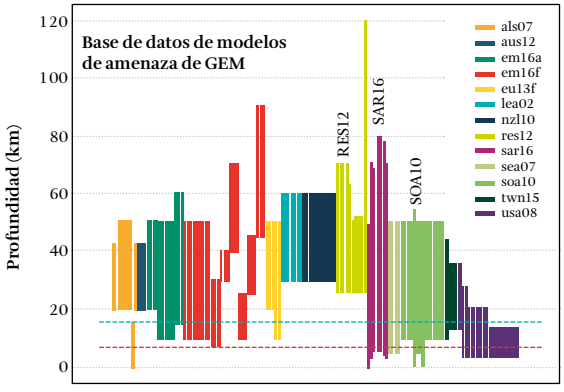



**Figura 62.** Dimensiones de fuentes interplaca; profundidad de los límites: mínimo y máximo

La delimitación en profundidad de los límites (mínimo y máximo) de las fuentes interplaca se realizó a partir de la información contenida en las secciones definidas de la placa de subducción del Pacífico, respecto a mecanismos focales, dimensión, orientación y tipología predominante de las rupturas.

Tal análisis se complementó con experiencias de modelos compilados por la Fundación GEM (figura 62) y con estudios previos enfocados en la definición de la geometría del proceso de subducción del Pacífico colombiano (Pedraza García *et al.*, 2007). Como referencia, se consideraron también los resultados de Lay *et al.* (2012), Thingbaijam y Mai (2016) y Heuret *et al.* (2011).

Con el fin de considerar incertidumbres (epistémicas) asociadas a las limitaciones en el conocimiento del proceso de subducción y de las fuentes interplaca, se plantearon dos modelos alternativos, que varían en los siguientes aspectos:

- *Profundidad de diferenciación entre zonas interplaca y Benioff.* Al respecto se consideran dos profundidades (40 y 50 km) como el límite inferior (*lsd*) de las fuentes interplaca. Vale la pena señalar que la selección de tales profundidades también define el límite superior (*usd*) de la zona Benioff. Las figuras 64 y 65 presentan la geometría en planta y los límites de profundidad de estas fuentes.
- *Segmentación de la placa.* Al respecto, se consideran dos aproximaciones: i) un modelo no segmentado, para el cual se estiman los parámetros de sismicidad en toda la fuente; ii) un modelo segmentado en el que, para cada segmento, se estiman los parámetros de sismicidad.

De acuerdo con una revisión de la sismicidad de la subducción del Pacífico colombiano, Sarria (1995) señala que se encuentran más sismos con magnitudes iguales o superiores a 5 en el sur del país, en el borde con Ecuador, que en la parte norte. De esta manera, se considera conveniente dividir la subducción para comprender mejor la amenaza.

Según Arcila y Dimaté (2005) y Monsalve *et al.* (2009), a partir de un análisis que combina la distribución geográfica de la sismicidad, anomalías

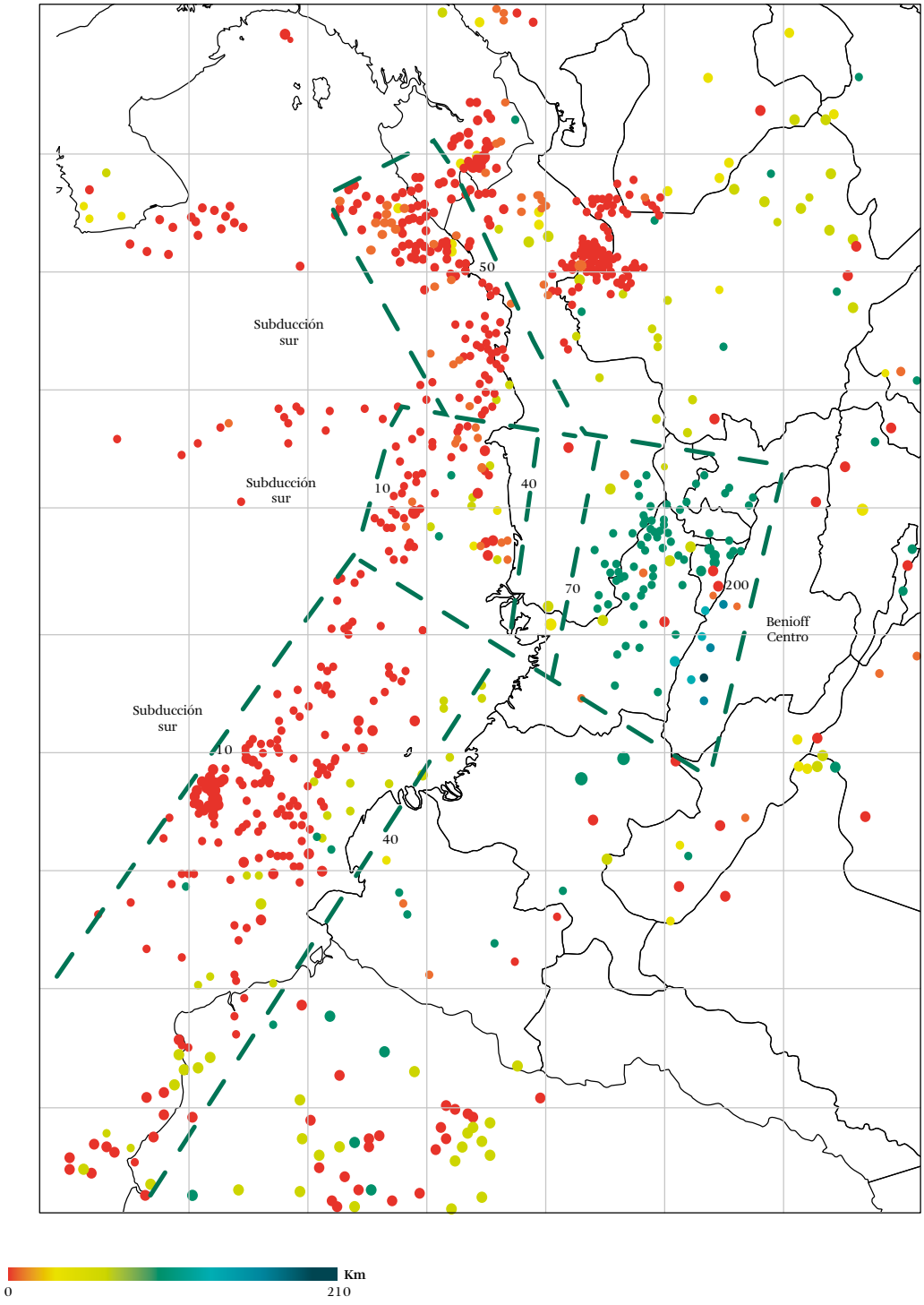



**Figura 63.** Segmentación de la zona de subducción de Colombia
**Fuente:** Arcila y Dimaté (2005)

gravimétricas y la morfología de la parte oriental de la cuenca de Panamá y la fosa colombiana, se proponen las siguientes zonas de comportamiento similar en la zona de subducción del Pacífico:

- *Subducción norte*. Corresponde a la subducción del bloque Coiba bajo el noroeste de Colombia.
- *Subducción centro*. Localizada en el sur del departamento de Chocó y en el departamento del Valle del Cauca.
- *Subducción sur*. Localizada en los departamentos de Cauca, Nariño y en el norte de Ecuador.

La tabla 24 y la figura 63 presentan las características de los segmentos de la zona de subducción definidos por Arcila y Dimaté (2005).

En el modelo no segmentado, la zona interplaca abarca desde la costa norte de Ecuador hasta Panamá; los límites de profundidad (*usd*, *lsd*) se estiman en 5 y 50 km de profundidad. Por otro lado, en el modelo segmentado estos límites son fijados en 5 y 40 km. La figura 64 presenta la geometría de las fuentes interplaca correspondiente a los modelos no segmentado y segmentado.

**Tabla 24.** Características de los segmentos de la zona de subducción

| Segmento | Longitud en la fosa (km) | Orientación (azimut) | Buzamiento | Magnitud máxima (Mw) |
|---|---|---|---|---|
| Norte | 170 | 130° | 25°-40° | 7,8 |
| Centro | 160 | 20° | 40°-110° | 7,8 |
| Sur | 550 | 40° | 30°-130° | 8,8 |

**Fuente:** Arcila y Dimaté (2005)

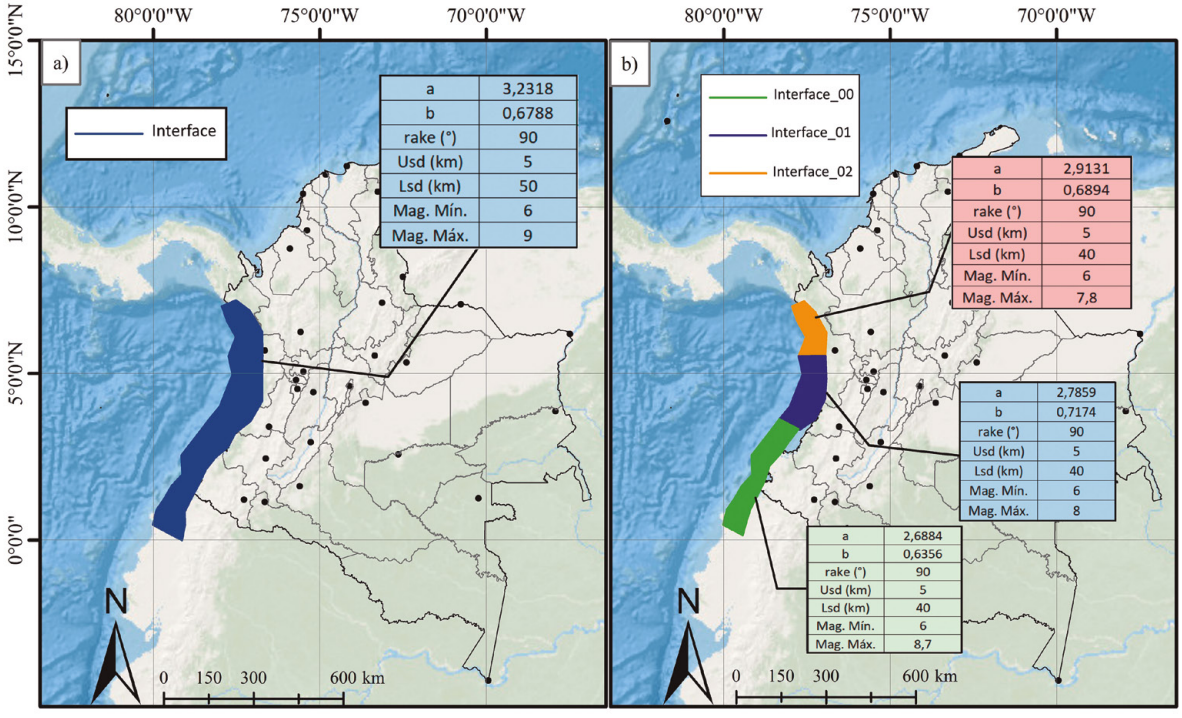



**Figura 64.** Parámetros de sismicidad de fuentes interplaca del proceso de subducción del Pacífico: **a)** modelo no segmentado; **b)** modelo segmentado

#### 4.3.3.3 Selección de eventos de cada una de las fuentes, según su tipología y caracterización sísmica

La selección de los eventos de cada una de las fuentes y su clasificación se han efectuado siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.1.5. Al respecto, se resalta que las geometrías definidas de las zonas interplaca e intraplaca (tanto en planta como en profundidad) se utilizaron para seleccionar subconjuntos de eventos del Catálogo Sísmico Integrado depurado (sin eventos dependientes). Tales subconjuntos se utilizaron para caracterizar las fuentes sísmicas según su clasificación tectónica.

Asimismo, vale la pena señalar que en el proceso de selección se consideró como referencia la siguiente información:

- *Mecanismos focales.* Teniendo en cuenta el tipo de ruptura y su orientación, se encuentra que la mayoría de los sismos interplaca son de tipo inverso (*reverse*), mientras que en la zona Benioff, la mayoría son de tipo normal y *strike-slip*.
- *Modelos estructurales.* Límite Moho, límite corteza/manto (Moho, figura 33).
- *Topografía/batimetría.* Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) topography (Farr *et al.*, 2007).
- General Bathymetric Charts of the Ocean (Gebco) bathymetry (Weatherall *et al.*, 2015).
- *Volcanes.* Se utiliza la localización de los volcanes como indicadores de variaciones en la geometría de la placa subducente y del límite interplaca/Benioff.
- *Otros modelos.* Geometría de la placa según los modelos SLAB1.0, SLAB2.0, (Hayes *et al.*, 2012; Hayes *et al.*, 2018); proyecto SARA (García *et al.*, 2017).

Una vez seleccionados los eventos se procedió a calcular los parámetros de sismicidad de las fuentes. Los parámetros *a* y *b* fueron obtenidos usando el método de máxima verisimilitud propuesto por Weichert (1980), disponible en la herramienta HMTK (Weatherill, 2014). Un resumen de dichos parámetros se presentan en las figuras 64 (para fuentes interplaca), 65 (fuentes de la zona Benioff) y 66 (fuentes del nido sísmico de Bucaramanga).

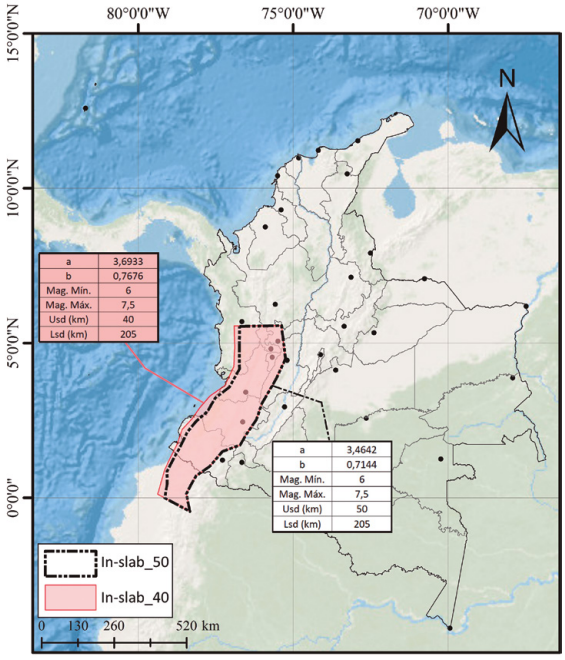



**Figura 65.** Parámetros de sismicidad de fuentes de la zona Benioff

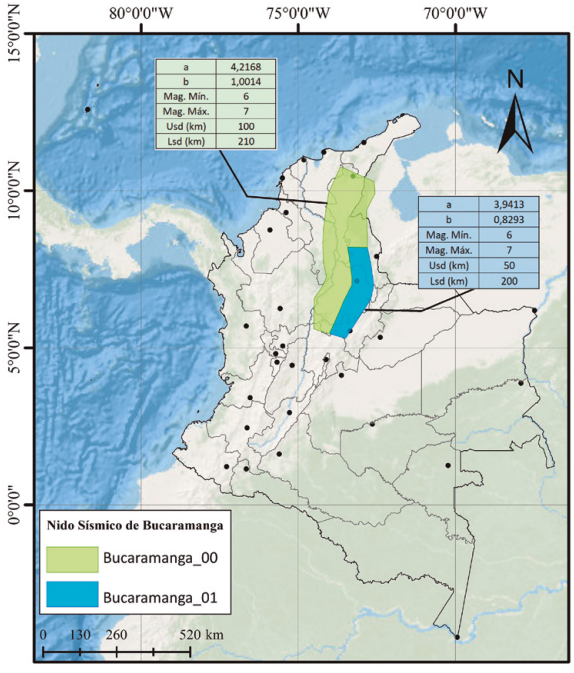



**Figura 66.** Parámetros de sismicidad de fuentes del nido de Bucaramanga

#### 4.3.3.4 Modelación de fuentes interplaca

Para modelar las fuentes interplaca se utilizó un tipo de fuente denominado "falla compleja" del motor de cálculo OpenQuake. Este tipo de fuente permite considerar variaciones de la profundidad en la geometría de la falla, lo cual posibilita un mayor refinamiento en la simulación de posibles rupturas de la fuente.

Para definir la geometría de la fuente se definen dos bordes que limitan la superficie superior e inferior en la dirección de buzamiento de la placa subducente. Además, se definen límites intermedios a lo largo de fuente (figura 67). El borde superior se definió en 5 km, y el borde inferior varía entre 40 y 50 km, según las alternativas descritas en la sección 4.3.3.2.

Además de la geometría, para caracterizar estas fuentes se requieren los siguientes parámetros:

- *Distribución de frecuencia de magnitudes*: Obtenida a partir del análisis de parámetros de sismicidad.
- *Relación de escala de magnitudes*: Se considera la relación propuesta por Strasser *et al.* (2010).
- *Relación de aspecto del área de ruptura*: Se adopta un valor de 4.
- *Geometría de la ruptura*: Corresponde el ángulo de deslizamiento (*rake*) de las rupturas. Se considera un valor de 90.

Mediante este tipo de fuente, en un rango específico de magnitudes (según la distribución de magnitud-frecuencia), las rupturas "flotan" a lo largo de la superficie de la falla.

La figura 68 presenta variaciones de la profundidad de la superficie de fuentes interplaca en el modelo no segmentado, en el que se considera una profundidad límite de 50 km.

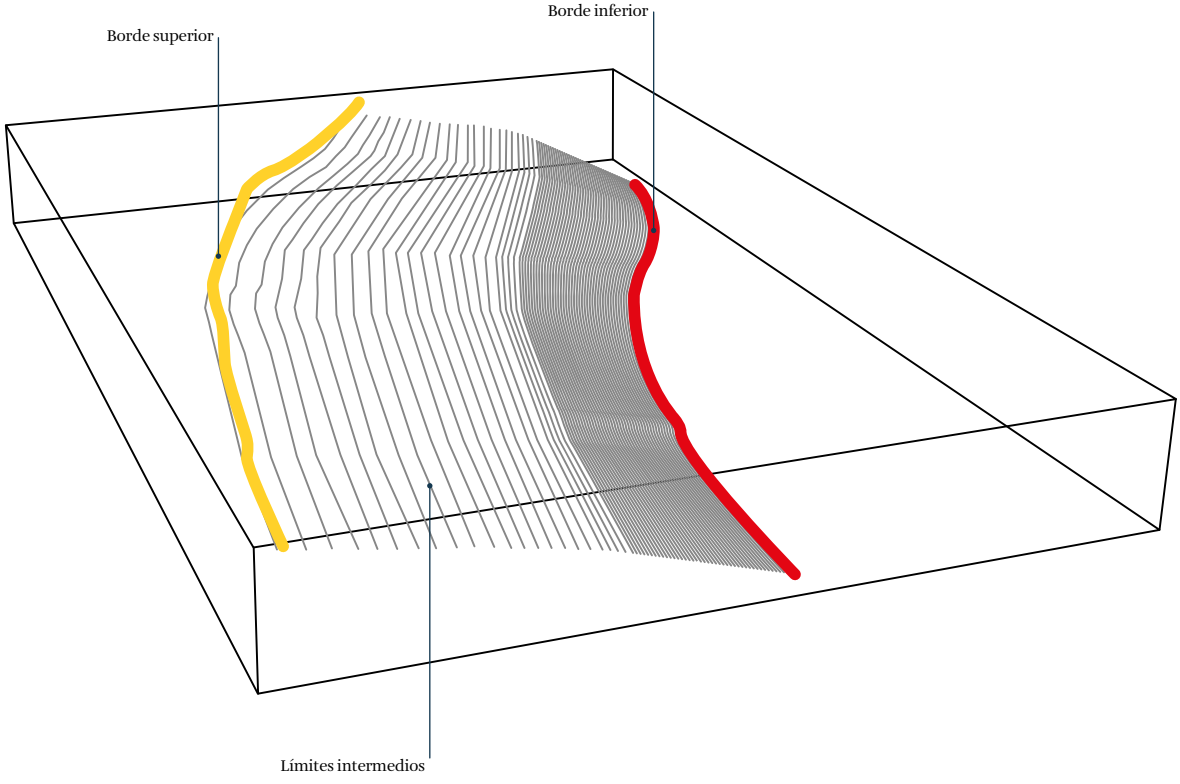



**Figura 67.** Ejemplo de una falla compleja
**Fuente:** Adoptado de Pagani *et al.* (2014b)

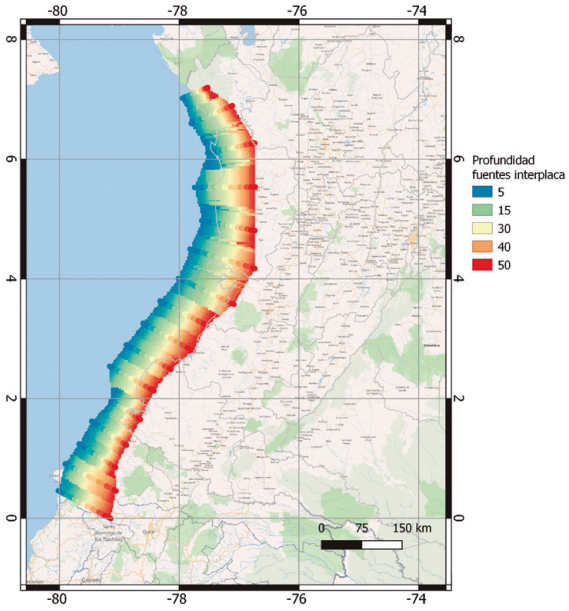



**Figura 68.** Profundidad de la superficie de fuentes interplaca. Modelo no segmentado

#### 4.3.3.5 Modelación de fuentes intraplaca

Para la modelación de las fuentes de la zona de Benioff y del nido sísmico de Bucaramanga se utilizó el tipo de fuentes no paramétricas establecido en el motor de cálculo OpenQuake. Este tipo de fuente representa una colección de rupturas. Esta colección se define a partir de un algoritmo que modela la ruptura como una malla de puntos que representan una aproximación de la placa que subduce más allá del límite último de profundidad de la zona de interplaca.

La geometría de las rupturas está restringida en la dirección del buzamiento de la placa y en su dirección conjugada, y está confinada dentro del volumen de la placa que subduce. Las figuras 69 y 70 presentan, respectivamente, la vista en planta y en profundidad de la malla de puntos definida en rupturas de magnitud 6,05 en la zona de Benioff.

Para caracterizar la ocurrencia de terremotos de cada una de las fuentes de subducción e intraplaca se usa un catálogo regionalizado según ambientes tectónicos (véase la sección 4.1), considerando una distribución de Gutenberg-Richter doblemente truncada, similar a los casos descritos.

La magnitud mínima considerada en las distribuciones de magnitud frecuencia es de 6 Mw, mientras que la magnitud máxima ha sido definida de acuerdo con una función de escala (Strasser *et al.*, 2010), teniendo en cuenta la geometría de la fuente, así como información de terremotos históricos.

Vale destacar que en las zonas intraplaca (Benioff), las tasas de ocurrencia de cada una de las rupturas no paramétricas fueron obtenidas a partir de las tasas de ocurrencia de la distribución de magnitud frecuencia de todo el volumen.

De cada ruptura se definen magnitudes, la localización del hipocentro y su geometría, y se le asignan probabilidades de ocurrencia en un periodo de investigación.

En el anexo G se presentan detalles de las distribuciones de magnitud frecuencia de las fuentes de interplaca, de la zona Benioff y del nido sísmico de Bucaramanga.

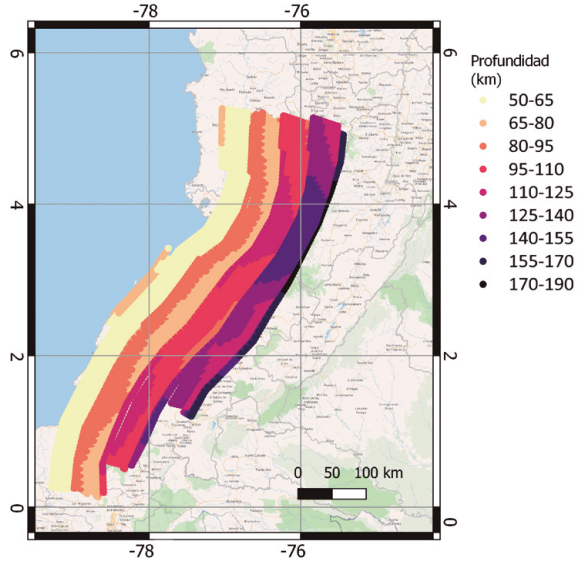



**Figura 69.** Vista en planta de la malla que representa la placa en la zona de Benioff, correspondiente a una magnitud de 6,05 Mw

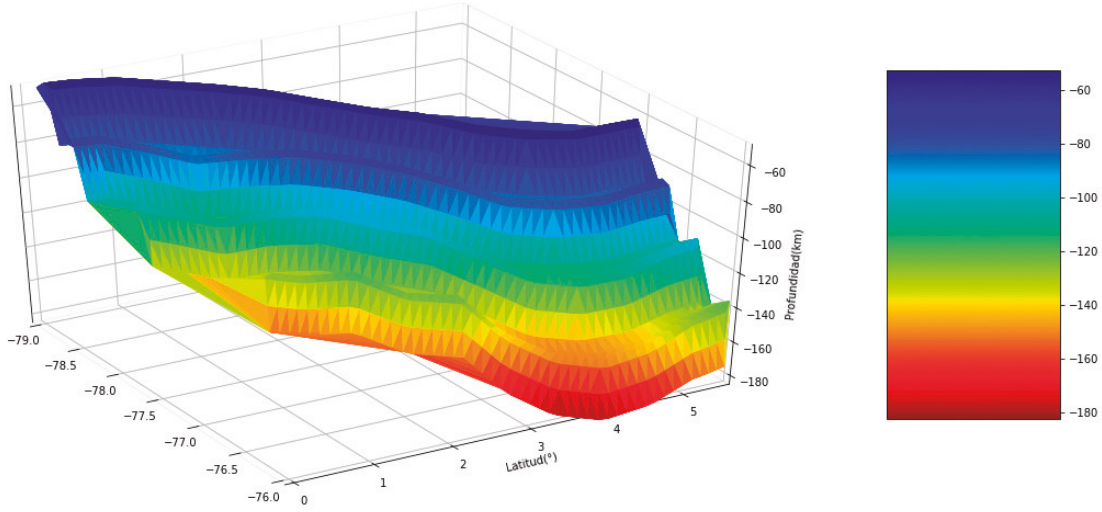



**Figura 70.** Malla de puntos de la placa de la zona de Benioff correspondiente a una magnitud de 6,05 Mw

# 5

# Selección de ecuaciones de atenuación

Las ecuaciones de atenuación (GMPE, por la sigla en inglés de *ground motion prediction equations*) permiten estimar, en un sitio determinado, la intensidad esperada del movimiento, en términos de aceleraciones espectrales, a partir de la magnitud de los sismos y la distancia entre el evento y el sitio de interés, entre otros parámetros de carácter sísmico, tectónico, físico y geométrico (PEER, 2013; Kaklamanos *et al.*, 2011).

A escala global, las ecuaciones de atenuación han sido desarrolladas a partir de diferentes bases de datos, enfocadas en diferentes ambientes tectónicos y con diversas métricas y formas funcionales. En Ojeda y Martínez (1997), Gallego (2000) y Bernal (2014) se encuentran ecuaciones de atenuación desarrolladas considerando registros acelerográficos de Colombia.

Entre los alcances y limitaciones de las ecuaciones de atenuación derivadas para el caso colombiano se encuentran las siguientes: i) son aplicables para estimar aceleraciones en periodos de vibración de hasta 2 segundos; ii) en su desarrollo no se contó con datos suficientes para estimar intensidades asociadas al movimiento de los sismos con magnitudes superiores a 7 Mw; iii) en el momento de su desarrollo no se contó con una caracterización de los efectos de sitio en la localización de las estaciones; la información disponible correspondía a una clasificación geológica de la estación en las categorías "roca" y "suelo".

Para elaborar el modelo nacional de amenaza sísmica, el SGC realizó un análisis estadístico a partir del cual se obtiene un árbol lógico que corresponde a un conjunto de ecuaciones de atenuación que mejor se ajustan a las aceleraciones espectrales observadas en el territorio nacional, así como sus porcentajes de participación correspondientes. Mediante este árbol es posible calcular un valor ponderado de las aceleraciones espectrales que se obtienen de los diferentes modelos seleccionados, considerando la incertidumbre epistémica producto de la variedad de GMPE existentes (Al Atik y Youngs, 2014).

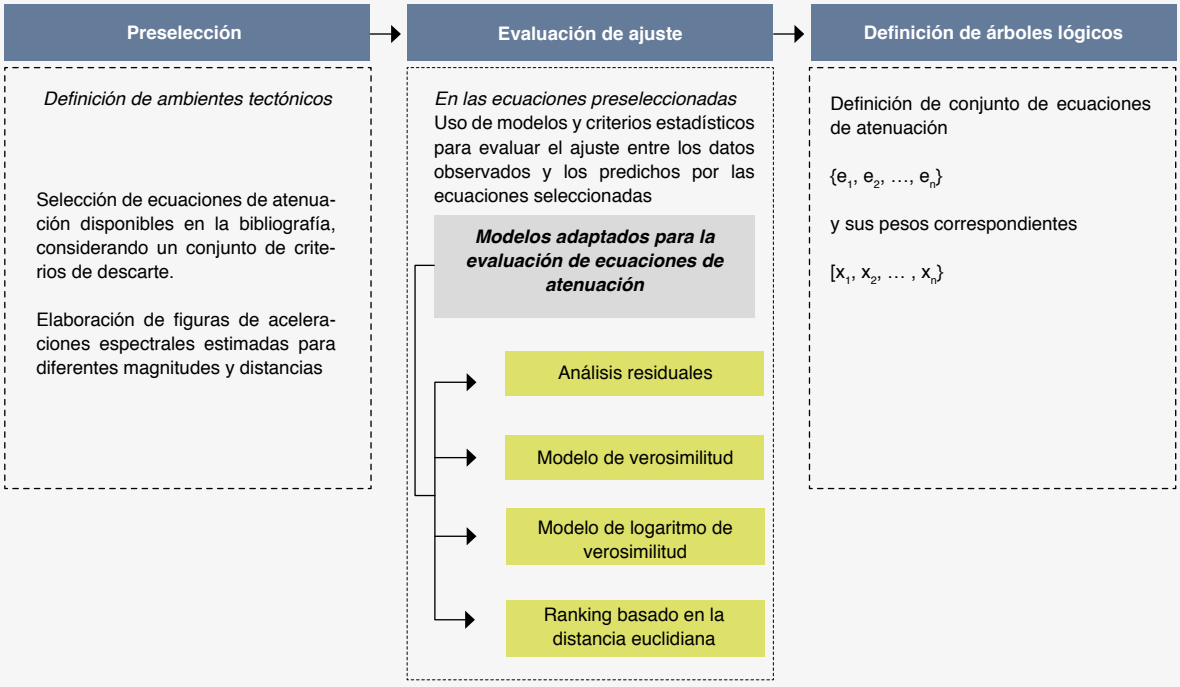



**Figura 71.** Procedimiento empleado en la selección de ecuaciones de atenuación

Como antecedente, en el marco del proyecto South America Risk Assessment (SARA, García *et al.*, 2017), el SGC participó en la revisión y selección de ecuaciones de atenuación con mejor ajuste a los datos observados de eventos sísmicos de Suramérica. Dicho trabajo se llevó a cabo comparando los registros sísmicos de la red de acelerógrafos con las ecuaciones más recientes en uso a escala global y nacional, y se obtuvo un conjunto de ecuaciones para los siguientes ambientes tectónicos: fuentes corticales, de interplaca e intraplaca, así como de diferentes periodos estructurales (García *et al.*, 2017).

En los siguientes numerales, se presentan el procedimiento (figura 71) y se describen los resultados obtenidos en el proceso de selección de ecuaciones y de definición de árboles lógicos de cada ambiente tectónico.

El análisis se llevó a cabo utilizando la base de datos de movimiento fuerte (véase la sección 3.3) y la caracterización de los parámetros para la estimación de efectos de sitio en la localización de las estaciones (véase la sección 3.3.2). La utilización de esta caracterización en la selección de modelos de atenuación en el país es un avance importante, ya que permite evaluar más detalladamente las intensidades del movimiento esperadas, en contraste con los modelos en los que se consideran las categorías de "suelo" y "roca" para describir la geología de las estaciones.

## 5.1 Preselección de ecuaciones de atenuación

Se realizó una preselección de ecuaciones de atenuación disponibles en la bibliografía, con el fin de reducir el número de ecuaciones que se incluirían en la evaluación de ajuste respecto a los movimientos del terreno observados.

La preselección se realizó teniendo en cuenta un catálogo global de ecuaciones de atenuación (Douglas, 2018), así como la metodología y los resultados obtenidos en la preselección de ecuaciones de atenuación para diferentes ambientes tectónicos en Suramérica (García *et al.*, 2017).

La preselección realizada incluye de manera implícita los criterios propuestos por Cotton *et al.* (2006), que permiten descartar ecuaciones de atenuación, y que se presentan a continuación:

- El modelo fue determinado para un ambiente tectónico irrelevante en la región de estudio.
- El modelo no ha sido publicado en una revista indexada o no ha estado sometido a un proceso de revisión de pares.
- La documentación del modelo y su set de datos se consideran insuficientes.
- El modelo ha sido actualizado en nuevas publicaciones.
- El rango de frecuencias definidas para el modelo es insuficiente para su aplicación en ingeniería.
- El modelo tiene una forma funcional inapropiada.
- Los métodos de regresión y sus coeficientes se consideran inapropiados.

En el proceso de preselección se dio prioridad a ecuaciones con periodo estructural máximo definido de al menos cinco segundos. Sobre estas ecuaciones se señala que, además de haber sido evaluadas mediante las metodologías adoptadas en el presente estudio (véase la sección 5.2), algunas fueron descartadas debido al rango de periodos estructurales para las que son válidas (menores a cinco segundos), evitando cualquier tipo de extrapolación para periodos más altos.

Las tablas 25, 26 y 27 presentan las ecuaciones preseleccionadas para los ambientes tectónico cortical, interplaca e intraplaca, respectivamente.

**Tabla 25.** Ecuaciones preseleccionadas para eventos corticales

| Nombre | Fuente |
|---|---|
| AbrahamsonEtAl2014 | Abrahamson *et al.* (2014) |
| AbrahamsonEtAl2014RegCHN | |
| AbrahamsonEtAl2014RegJPN | |
| AbrahamsonEtAl2014RegTWN | |
| AbrahamsonSilva2008 | Abrahamson y Silva (2008) |
| AkkarCagnan2010 | Akkar y Cagnan (2010) |
| AkkarEtAlRepi2014 | Akkar *et al.* (2014) |
| AkkarEtAlRhyp2014 | |
| AkkarEtAlRjb2014 | |
| BindiEtAl2014Rhyp | Bindi *et al.* (2014) |
| BindiEtAl2014RhypEC8 | |
| BindiEtAl2014RhypEC8NoSOF | |
| BindiEtAl2014Rjb | |
| BindiEtAl2014RjbEC8 | |
| BindiEtAl2014RjbEC8NoSOF | |
| BooreAtkinson2008 | Boore y Atkinson (2008) |
| BooreEtAl2014 | Boore *et al.* (2014) |
| BooreEtAl2014CaliforniaBasin | |
| BooreEtAl2014CaliforniaBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014HighQ | |
| BooreEtAl2014HighQCaliforniaBasin | |
| BooreEtAl2014HighQCaliforniaBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014HighQJapanBasin | |
| BooreEtAl2014HighQJapanBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014HighQNoSOF | |
| BooreEtAl2014JapanBasin | |
| BooreEtAl2014JapanBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014LowQ | |
| BooreEtAl2014LowQCaliforniaBasin | |
| BooreEtAl2014LowQCaliforniaBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014LowQJapanBasin | |
| BooreEtAl2014LowQJapanBasinNoSOF | |
| BooreEtAl2014LowQNoSOF | |
| BooreEtAl2014NoSOF | |
| CampbellBozorgnia2014 | Campbell y Borzognia (2014) |
| CampbellBozorgnia2014HighQ | |
| CampbellBozorgnia2014HighQJapanSite | |
| CampbellBozorgnia2014JapanSite | |

(.../...)

| Nombre | Fuente |
|---|---|
| CampbellBozorgnia2014LowQ | Campbell y Borzognia (2014) |
| CampbellBozorgnia2014LowQJapanSite | |
| CauzziEtAl2014 | Cauzzi *et al.* (2014) |
| CauzziEtAl2014Eurocode8 | |
| CauzziEtAl2014Eurocode8NoSOF | |
| CauzziEtAl2014FixedVs30 | |
| CauzziEtAl2014FixedVs30NoSOF | |
| CauzziEtAl2014NoSOF | |
| CauzziFaccioli2008 | Faccioli y Cauzzi (2008) |
| CauzziFaccioli2008SWISS01 | |
| CauzziFaccioli2008SWISS04 | |
| CauzziFaccioli2008SWISS08 | |
| ChiouYoungs2014 | Chiou y Youngs (2014) |
| FaccioliEtAl2010 | Faccioli *et al.* (2010) |
| Idriss2014 | Idriss (2014) |
| Kanno2006Deep | Kanno *et al.* (2006) |
| Kanno2006Shallow | |
| ZhaoEtAl2016Asc | Zhao *et al.* (2016a) |
| ZhaoEtAl2016AscSiteSigma | |
| ZhaoEtAl2016UpperMantle | |
| ZhaoEtAl2016UpperMantleSiteSigma | |

**Tabla 26.** Ecuaciones pre seleccionadas para eventos de Interplaca

| Nombre | Fuente |
|---|---|
| AbrahamsonEtAl2015SInter | Abrahamson *et al.* (2016) |
| AbrahamsonEtAl2015SInterHigh | |
| AbrahamsonEtAl2015SInterLow | |
| GhofraniAtkinson2014 | Ghofrani y Atkinson (2014) |
| GhofraniAtkinson2014Cascadia | |
| GhofraniAtkinson2014CascadiaLower | |
| GhofraniAtkinson2014CascadiaUpper | |
| GhofraniAtkinson2014Lower | |
| GhofraniAtkinson2014Upper | |
| Kanno2006Deep | Kanno *et al.* (2006) |
| Kanno2006Shallow | |
| LinLee2008SInter | Lin y Lee (2008) |
| MontalvaEtAl2016SInter | Montalva *et al.* (2017) |
| YoungsEtAl1997SInter | Youngs *et al.* (1997) |
| YoungsEtAl1997SInterNSHMP2008 | |
| ZhaoEtAl2006SInter | Zhao *et al.* (2006) |
| ZhaoEtAl2006SInterNSHMP2008 | |
| ZhaoEtAl2016SInter | Zhao *et al.* (2016b) |
| ZhaoEtAl2016SInterSiteSigma | |

**Tabla 27.** Ecuaciones pre seleccionadas para eventos de Intraplaca.

| Nombre | Fuente raíz |
|---|---|
| AbrahamsonEtAl2015SSlab | Abrahamson *et al.* (2016) |
| AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh | |
| AbrahamsonEtAl2015SSlabLow | |
| GarciaEtAl2005SSlab | García *et al.* (2005) |
| GarciaEtAl2005SSlabVert | |
| Kanno2006Deep | Kanno *et al.* (2006) |
| Kanno2006Shallow | |
| LinLee2008SSlab | Lin y Lee (2008) |
| MontalvaEtAl2016SSlab | Montalva *et al.* (2017) |

(…/…)

| | |
|---|---|
| YoungsEtAl1997GSCSSlabBest | Youngs *et al.* (1997) |
| YoungsEtAl1997GSCSSlabLowerLimit | |
| YoungsEtAl1997GSCSSlabUpperLimit | |
| YoungsEtAl1997SSlab | Zhao *et al.* (2006) |
| ZhaoEtAl2006SSlab | |
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 | |
| ZhaoEtAl2016SSlab | Zhao *et al.* (2016c) |
| ZhaoEtAl2016SSlabSiteSigma | |

## 5.2 Evaluación de ecuaciones de atenuación

En esta sección se presentan aspectos generales sobre la metodología y los resultados obtenidos del análisis estadístico de las ecuaciones de atenuación preseleccionadas. En el análisis se utilizaron los registros de la base de datos compilada en el presente estudio (véase el capítulo 3). Este análisis permite identificar, en cada ambiente tectónico, las ecuaciones con mayor ajuste entre las aceleraciones observadas y las predichas por las ecuaciones de atenuación, así como los correspondientes porcentajes de participación.

Las ecuaciones de atenuación seleccionadas utilizan diferentes mediciones para evaluar la distancia entre la ruptura y el sitio en el que se desea estimar la intensidad del movimiento. Entre los tipos de distancias adoptadas se encuentran los siguientes:

- *Joyner and Boore* ($R_{JB}$). Representa la distancia horizontal a la proyección de la proyección en superficie de la ruptura
- *Rx*. Distancia horizontal al tope superior de la ruptura
- $R_{rup}$. Distancia más corta al plano de la ruptura
- $R_{hyp}$. Distancia hipocentral

En la evaluación de tales distancias se utilizaron las relaciones de escala generadas por Leonard (2014) para eventos corticales y las relaciones desarrolladas por Strasser *et al.* (2010) para los ambientes tectónicos de subducción. En Klakamanos *et al.* (2011) se presentan recomendaciones para la evaluación de estas distancias. La figura 72 presenta un esquema de dichas distancias.

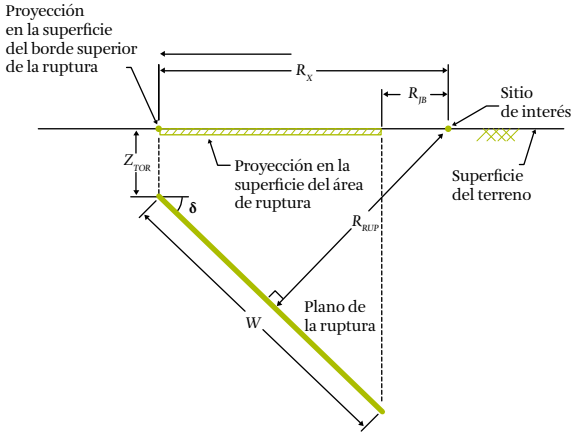



**Figura 72.** Tipos de medidas de la distancia entre sitios de análisis y rupturas
**Fuente:** tomado y modificado de Klakamanos *et al.* (2011)

Para evaluar las ecuaciones de atenuación se utilizaron los siguientes procedimientos: análisis de residuales; modelo de verosimilitud (LH, abreviatura de *likelihood*); logaritmo de verosimilitud normalizado (LLH, abreviatura de *log likelihood*); y ranking basado en la distancia euclidiana (EDR, por sus siglas en inglés). En el anexo H se presentan detalles de cada uno de los procedimientos utilizados. La evaluación se llevó a cabo usando las herramientas de análisis de movimiento fuerte (SMTK) desarrolladas por la Fundación GEM (Weatherill, 2014).

### 5.2.1 Definición de árboles lógicos de ecuaciones de atenuación

En la selección de las ecuaciones de atenuación, así como en la definición de los pesos del árbol lógico, se adoptó como criterio principal el valor del modelo LLH para el rango de periodos estructurales considerado en el presente estudio (entre 0 y 5 segundos, con intervalos cada 0,1 segundos).

Con las ecuaciones de mejor ajuste se realizó también el análisis de residuales, así como la evaluación mediante los modelos de verosimilitud (LH), logaritmo de verosimilitud normalizado (LHH) y el ranking basado en la distancia euclidiana normalizada (EDR). Tales análisis se ejecutaron en cada uno de los periodos estructurales con el fin de identificar si los ajustes no variaban significativamente entre periodos.

En la tabla 28 se presenta el resumen de los parámetros evaluados y el rango de valores en que se considera un buen ajuste de cada uno.

**Tabla 28.** Parámetros de evaluación

| Parámetro | Descripción |
|---|---|
| Mediana residuales | Buen ajuste si es cercano a 0 |
| Media residuales | Buen ajuste si es cercano a 0 |
| Desviación residuales | Buen ajuste si es cercano a 1 |
| LH | Buen ajuste si LH es cercano a 1 |
| LLH | Representa mejores ajustes para menores valores de LLH |
| EDR | Buen ajuste si EDR es cercano a 1 |
| K | Buen ajuste si k es cercano a 1 |

Usando el parámetro LHH se descartaron ecuaciones de menor ajuste hasta obtener un árbol lógico de tres ramas por cada ambiente tectónico, con un único peso, sin discriminar por periodo estructural.

En las siguientes secciones se presentan, por cada ambiente tectónico, los principales resultados de la evaluación y selección de ecuaciones de atenuación. En el anexo I se presenta un resumen de las propiedades geométricas calculadas con la herramienta SMTK, así como los valores de aceleración pico. Por su parte, en el anexo J se presentan todos los resultados según el ambiente tectónico.

#### 5.2.1.1 Resultados obtenidos en la zona Benioff

La figura 73 presenta las siguientes relaciones encontradas en la zona de Benioff: aceleración pico (PGA) y la magnitud Mw; PGA y la distancia hipocentral ($R_{hyp}$); pseudoaceleración de un oscilador de periodo de vibración de un segundo (SA(1 s)) y magnitud Mw; SA(1 s) y $R_{hyp}$. En estos datos se observa una tendencia de las aceleraciones a disminuir con respecto a la distancia hipocentral y a aumentar con respecto a la magnitud del evento, lo cual ratifica la consistencia en los registros utilizados y los parámetros geotécnicos y geofísicos estimados.

La figura 74 presenta los resultados de los diferentes modelos aplicados a la base de datos de movimiento fuerte de la zona de Benioff, considerando diferentes periodos estructurales (Te). En esta figura se incluyen únicamente los resultados de las ecuaciones preseleccionadas en las que se encontró un mejor ajuste según el parámetro LHH.

En términos de residuales, las ecuaciones con un mejor ajuste de la media y la mediana fueron los modelos de Montalva *et al.* (2017) (modificado), Abrahamson *et al.* (2016) y de García *et al.* (2005), y muestran un comportamiento estable en todos los periodos estructurales. De este conjunto, el modelo de García es el que presenta mayores desviaciones.

En términos de los párametros LH y el LLH, los modelos con mejor comportamiento a lo largo de todos los periodos estructurales estudiados fueron el de Montalva *et al.* (2017, modificado) y el de Abrahamson *et al.* (2016). El modelo de Zhao *et al.* (2006, versión modificada en el 2014 para el *Mapa de amenaza nacional de Estados Unidos*) mostró un mejor comportamiento que el de García únicamente en periodos menores de 1,5 segundos, a partir de los que el modelo de García presenta un mejor ajuste.

En términos del ranking basado en la distancia euclidiana (EDR), se obtienen resultados similares en todos los modelos, exceptuando en el de Zhao, en el que se observan mayores diferencias entre los datos observados y los predichos.

La tabla 29 presenta los pesos asignados al árbol lógico de ecuaciones de atenuación de la zona de Benioff. Tales valores corresponden al promedio de los pesos obtenidos del conjunto de periodos de vibración analizado. Individualmente, el peso de cada periodo de vibración se estimó usando los resultados del parámetro LLH. Este procedimiento se adoptó en los demás ambientes tectónicos.

**Tabla 29.** Pesos del árbol lógico de ecuaciones de atenuación correspondiente a la zona de Benioff

| Ecuación de atenuación | Peso |
|---|---|
| MontalvaEtAl2016SSlab | 0,424 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab | 0,365 |
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 | 0,210 |

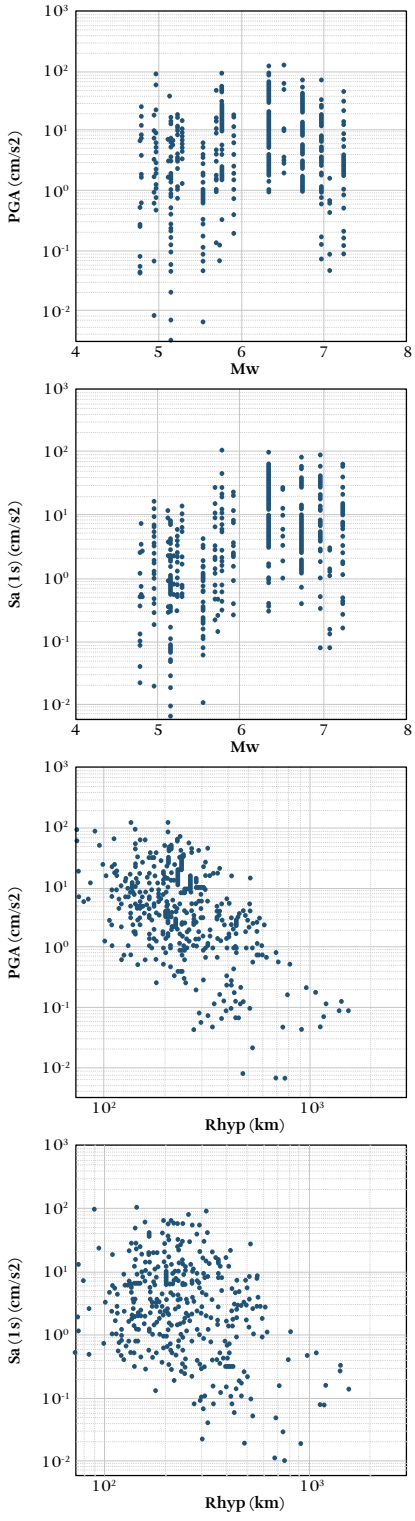



**Figura 73.** Datos de movimiento fuerte en la zona de Benioff

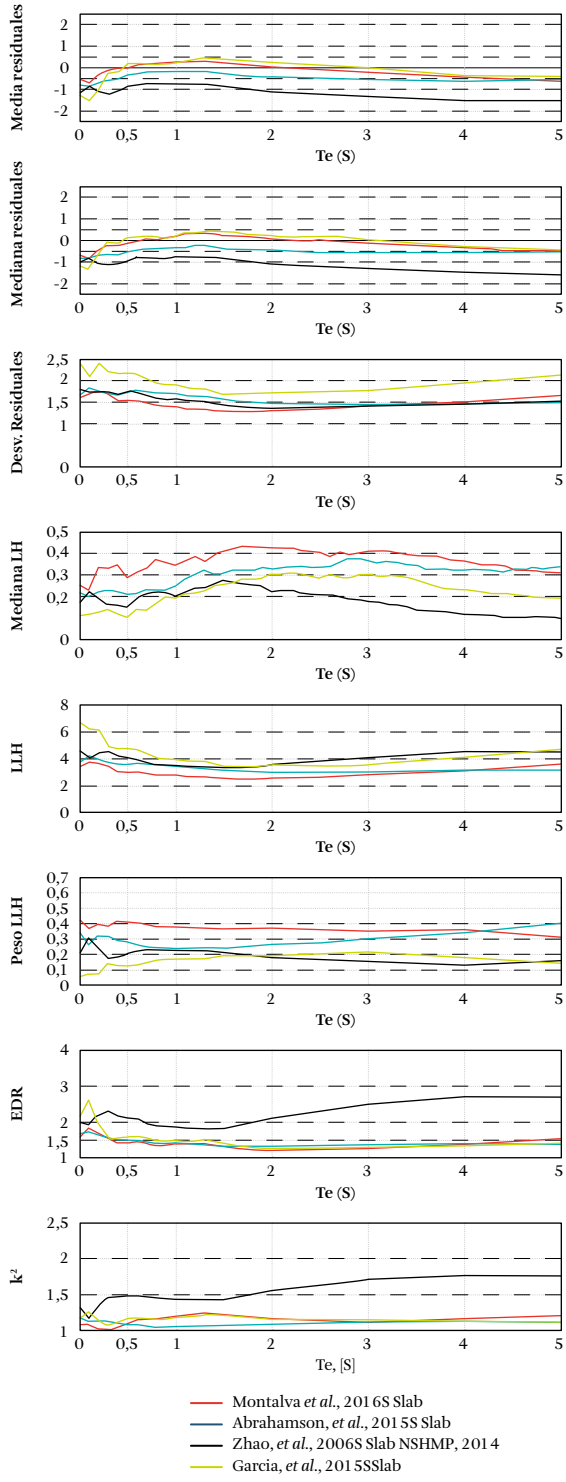



**Figura 74.** Resultados estadísticos de la zona de Benioff

#### 5.2.1.2 Resultados obtenidos en el nido sísmico de Bucaramanga

La figura 75 presenta las siguientes relaciones encontradas en la zona del nido sísmico de Bucaramanga: PGA y la magnitud Mw; PGA y $R_{hyp}$; SA(1 s) y la magnitud Mw; SA(1 s) y $R_{hyp}$. En esta figura se observa la atenuación de los valores de aceleración con respecto a la distancia. En el caso de la magnitud Mw, los valores observados se encuentran concentrados alrededor de valores de 5,0 y 6,2.

La figura 76 presenta los resultados de los diferentes procesos estadísticos aplicados a la base de datos de movimiento fuerte de la zona del nido de Bucaramanga. En esta figura se presentan únicamente los resultados de las ecuaciones con el mejor ajuste según el parámetro LLH.

En la figura 76 se observa un ajuste sobresaliente del modelo de Zhao *et al.* (2006) para periodos bajos (versión modificada). Según los resultados del parámetro LHH, dicha ecuación llega a tener un peso de alrededor de 70% en tales periodos. Este ajuste puede evidenciarse igualmente en la media y la mediana de los residuales obtenidos utilizando esta GMPE.

Los otros dos modelos con mejor ajuste fueron el de Abrahamson *et al.* (2015) y la versión previa (ajustada) del modelo de Montalva *et al.* (2017). Cabe destacar que estos modelos también tienen un adecuado desempeño para la región de Benioff. Según el análisis de residuales normalizados y del parámetro LHH (figura 76), estos modelos tienen un comportamiento similar. En ambas ecuaciones se observan mejores ajustes a partir de periodos de 0,5 s.

La tabla 30 presenta los pesos asignados al árbol lógico de ecuaciones de atenuación del nido sísmico de Bucaramanga.

**Tabla 30.** Pesos definitivos del árbol lógico de ecuaciones de atenuación correspondiente al nido de Bucaramanga

| Ecuación de atenuación | Peso |
|---|---|
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 | 0,443 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab | 0,285 |
| MontalvaEtAl2016SSlab | 0,272 |

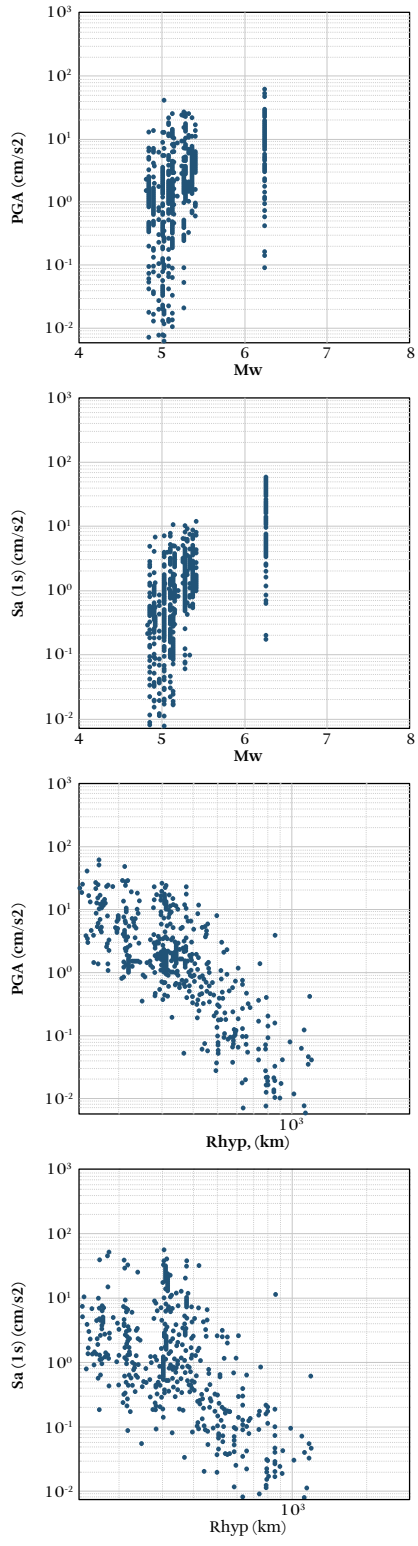



**Figura 75.** Datos de movimiento fuerte del nido de Bucaramanga

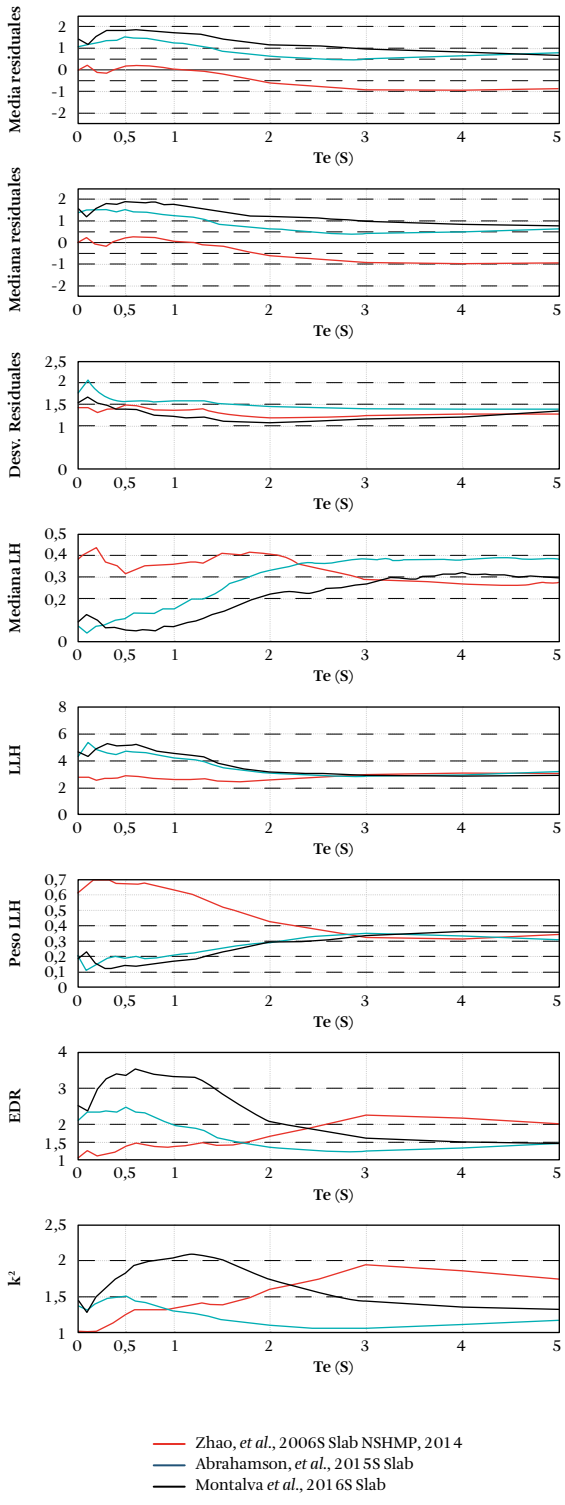



**Figura 76.** Resultados estadísticos del nido de Bucaramanga

### 5.2.1.3 Resultados obtenidos en la zona de interplaca del Pacífico

La figura 77 presenta las siguientes relaciones encontradas en la zona de interplaca de la subducción del Pacífico colombiano: PGA y magnitud Mw; PGA y $R_{hyp}$; SA(1 s) y la magnitud Mw; SA(1 s) y $R_{hyp}$. En este caso en particular, el amplio rango de magnitudes observadas en esta región tectónica permite visualizar una relación entre los valores de aceleración y la magnitud Mw de los diferentes eventos, aclarando que este efecto depende también de otros factores como la distancia a los sitios de observación.

En la figura 77 se puede observar una relación de atenuación entre las aceleraciones registradas y la distancia hipocentral. En esta figura se encuentra una menor dispersión de los valores de PGA que en Sa (1 s).

La figura 78 presenta los resultados de los diferentes criterios estadísticos aplicados a la base de datos de movimiento fuerte de la región de interplaca en la zona de subducción del Pacífico colombiano. Los resultados corresponden a las ecuaciones con el mejor ajuste según el parámetro LLH.

En la figura 78 se observa un buen ajuste de la ecuación propuesta por Abrahamson *et al.* (2015), con valores de EDR y de $K^2$ cercanos a 1, lo que indica una baja diferencia entre los datos observados y los predichos. Según el análisis de residuales, el modelo de Abrahamson *et al.* (2015) presenta los mejores ajustes y los valores más estables de los periodos de vibración considerados.

Según los parámetros LH y LLH, el modelo propuesto por Zhao *et al.* (2006) presenta un buen ajuste en periodos de vibración de entre 1 y 2 segundos.

En la tabla 31 se presentan los pesos asignados al árbol lógico de ecuaciones de atenuación de la zona de interplaca del Pacífico.

**Tabla 31.** Pesos definitivos del árbol lógico de ecuaciones de atenuación correspondiente a la zona de Interplaca del Pacífico

| Ecuación de atenuación | Peso |
|---|---|
| AbrahamsonEtAl2015SInter | 0,437 |
| ZhaoEtAl2006SInterNSHMP2008 | 0,348 |
| MontalvaEtAl2016SInter | 0,215 |

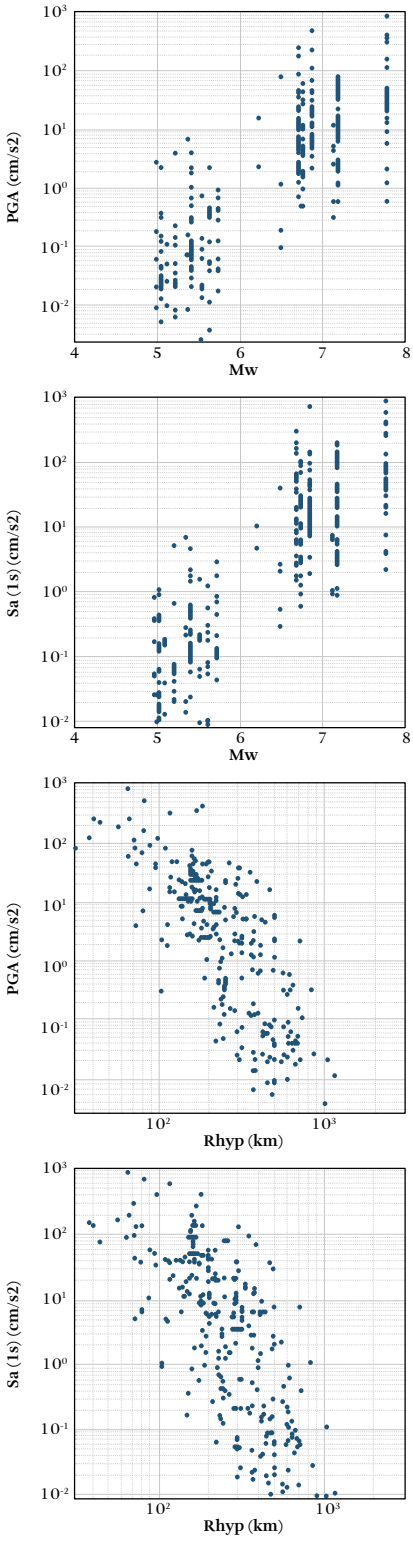



**Figura 77**. Datos de movimiento fuerte de la zona de Interplaca del Pacífico

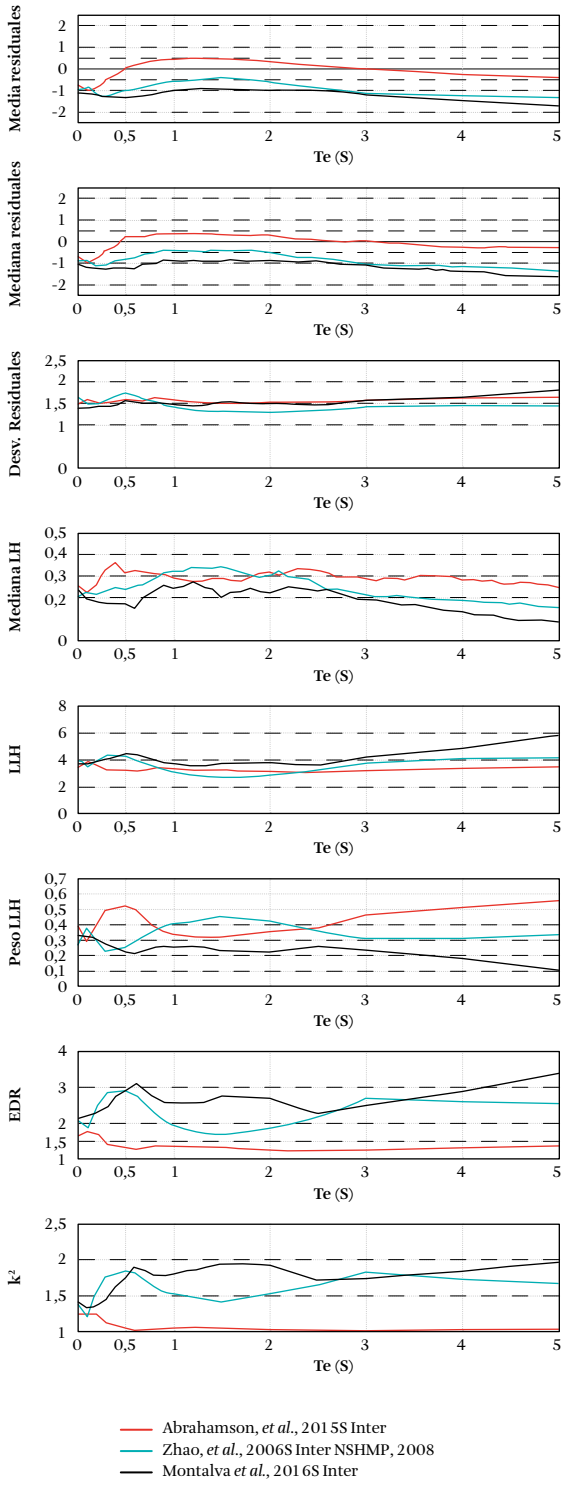



**Figura 78.** Resultados estadísticos de la zona deInterplaca del Pacífico

#### 5.2.1.4 Resultados obtenidos en la zona cortical

La figura 79 presenta las siguientes relaciones encontradas en la zona cortical: PGA y la magnitud Mw; PGA y $R_{hyp}$; SA(1 s) y la magnitud Mw; SA(1 s) y $R_{hyp}$. En esta figura se observa una relación de atenuación de las aceleraciones con respecto a la distancia hipocentral calculada. También se observan incrementos en las pseudoaceleraciones espectrales (en especial en periodos de vibración de 1 s) a medida que se aumenta la magnitud de los eventos.

La figura 80 presenta los resultados de los diferentes criterios estadísticos aplicados a la base de datos de movimiento fuerte de la zona cortical. En esta región tectónica, el mejor ajuste a los datos observados se obtiene con el modelo de Idriss (2014). Según el análisis de residuales normalizados, esta relación mostró un desempeño muy estable a lo largo de todos los periodos de vibración (la mediana de los residuales normalizados es cercana a 0). Asimismo, esta ecuación presenta una mejor calificación según el ranking basado en la distancia euclidiana (EDR), para periodos de vibración superiores a 0,5 s (figura 80).

Según el análisis de los parámetros LH y LHH, las ecuaciones de atenuación de Cauzzi *et al.* (2014) y de Idriss (2014) tienen un comportamiento similar, y su ajuste a los datos observados es mejor que el obtenido usando el modelo de Abrahamson *et al.* (2014). La tabla 32 presenta los pesos asignados al árbol lógico de ecuaciones de atenuación de la zona cortical.

**Tabla 32.** Pesos definitivos del árbol lógico de ecuaciones de atenuación de eventos corticales

| Ecuación de atenuación | Peso |
|---|---|
| Idriss2014 | 0,399 |
| CauzziEtAl2014 | 0,389 |
| AbrahamsonEtAl2014 | 0,211 |

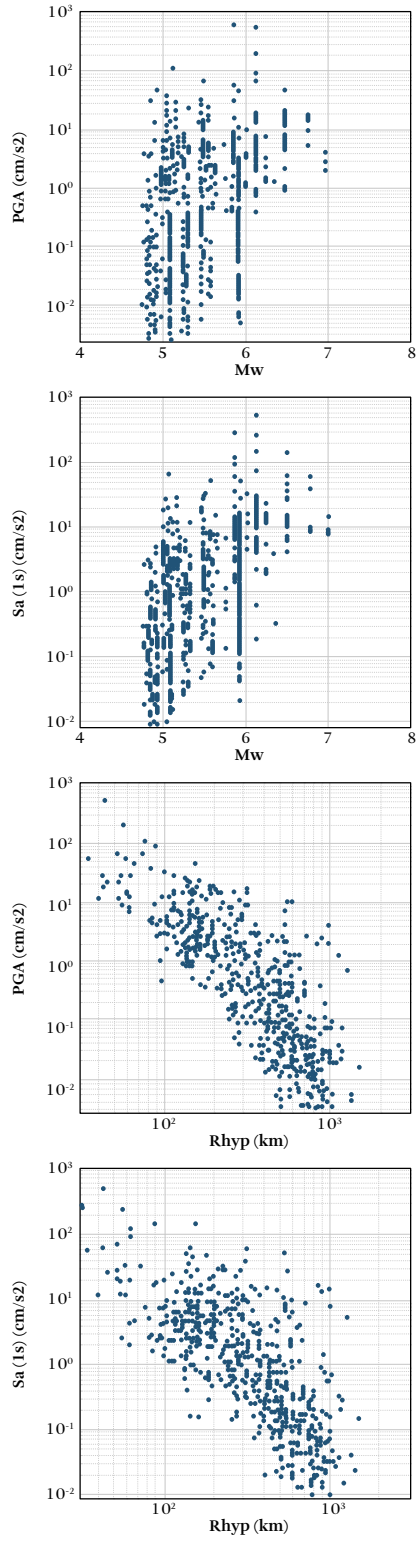



**Figura 79.** Datos de movimiento fuerte en eventos corticales

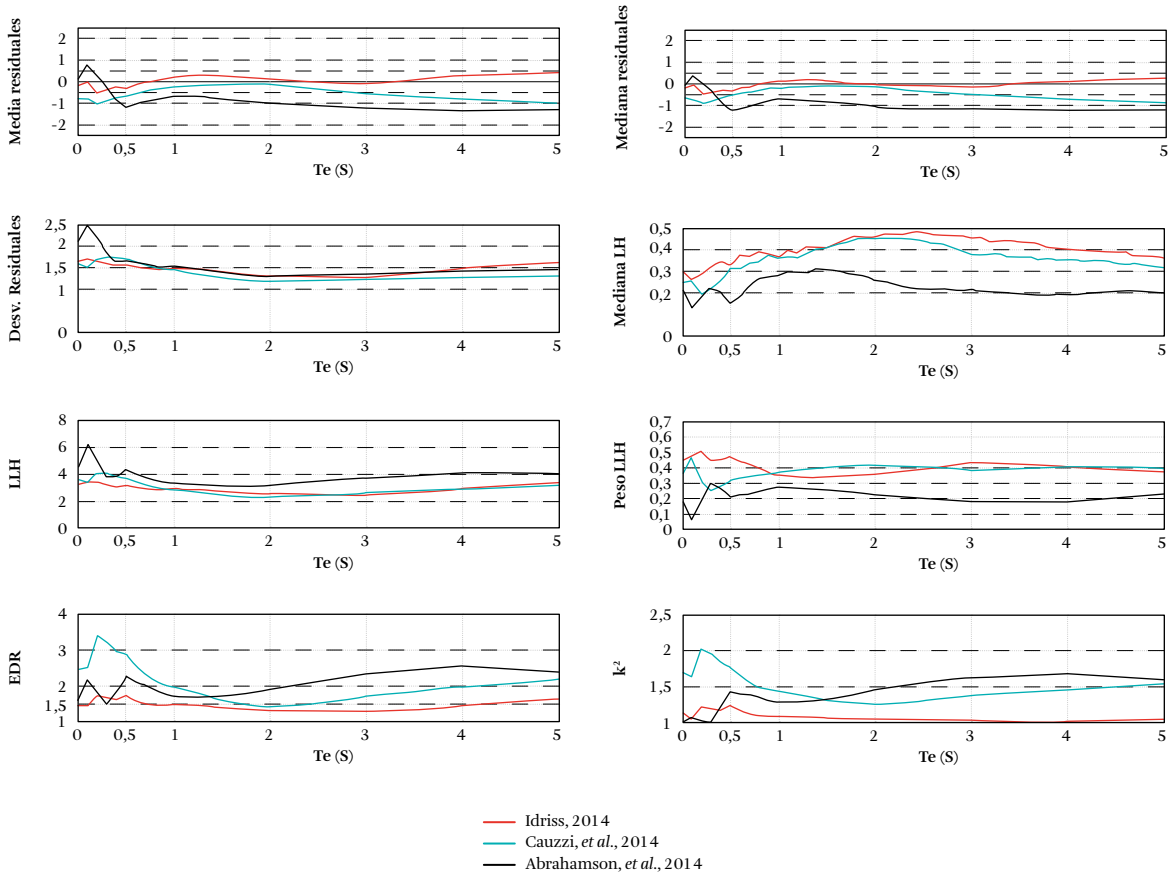
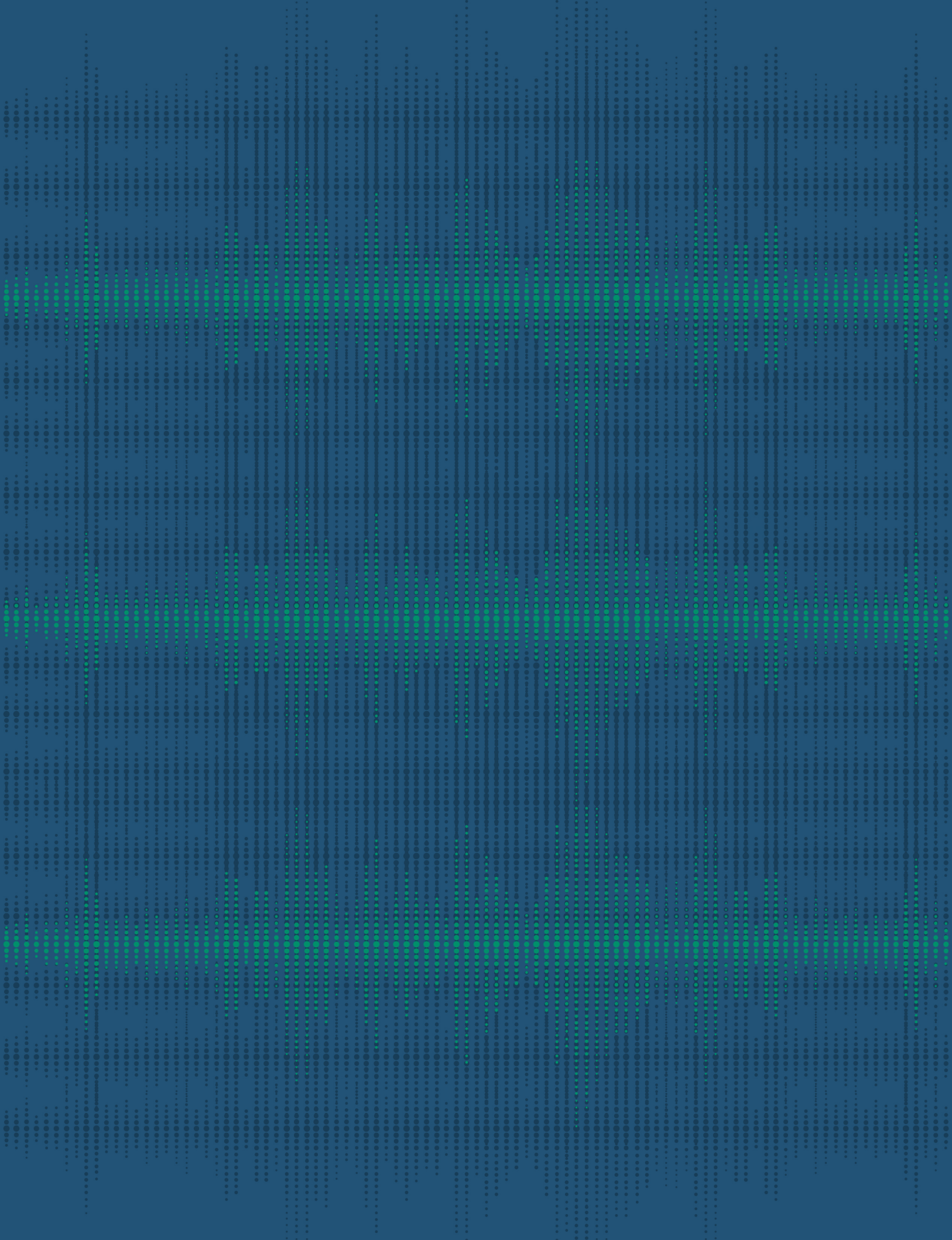



**Figura 80.** Resultados estadísticos de eventos corticales



# 6

# Cálculo de la amenaza sísmica

De forma general, un modelo de amenaza sísmica permite cuantificar las acciones sísmicas (p. ej., intensidades, aceleraciones espectrales, entre otros parámetros de medición) a las cuales se encuentra expuesta la población y la infraestructura.

En este estudio se adopta un enfoque probabilista, en el cual la amenaza sísmica se evalúa como la probabilidad con que un cierto valor de amenaza, definido por un parámetro del movimiento del terreno (*i. e.*, aceleración pico [PGA]), es superado (excedido) en un determinado sitio o región de estudio, considerando una ventana de observación (t) dada (Cornell, 1968).

En la siguiente expresión se define genéricamente el concepto anteriormente expuesto:

$$H = P\,[x\,(s) \geq x_0;\, t] \qquad [6.1]$$

En dónde la amenaza (H) viene representada por una función de probabilidad del parámetro que indica la intensidad del movimiento del terreno, x, en un sitio determinado (s), donde $Px(s) \geq x_0$ representa la probabilidad de superación de un umbral $x_0$ del parámetro elegido durante una ventana de observación (t).

Usualmente, la amenaza sísmica se expresa por medio de los siguientes resultados:

- *Curvas de amenaza*. Permiten identificar, en un sitio dado, la probabilidad de que sea excedido un conjunto de valores de intensidades del movimiento, considerando una ventana de observación (t). Así, en sitios de mayor peligro existe una mayor probabilidad de que un determinado valor de intensidad del movimiento sea excedido. Estas curvas son útiles para identificar las acciones sísmicas que pueden afectar los elementos expuestos, considerando diferentes niveles de seguridad (o periodos de retorno).
- *Espectros de amenaza uniforme.* Estas curvas contienen, en un sitio determinado y en un periodo de retorno dado, los valores de aceleración espectral es-

timados para diferentes periodos de vibración. Estos resultados son útiles para identificar las acciones sísmicas que pueden afectar las construcciones expuestas, según sus periodos estructurales.

- *Mapas de amenaza*. Corresponden a la distribución geográfica de una determinada intensidad del movimiento, en un determinado periodo de retorno. Por ejemplo, es posible obtener mapas de aceleración espectral de periodos de vibración de un segundo (Sa (1 s)), en un periodo de retorno de 475 años.

La evaluación de la amenaza en roca firme ($V_s$ 760 m/s) se llevó a cabo usando el motor de cálculo OpenQuake (Pagani *et al.*, 2014a) En este capítulo se describen la metodología adoptada y los principales componentes del modelo de amenaza. Más información acerca de los procedimientos de cálculo de amenaza sísmica usando OpenQuake se pueden consultar en Pagani *et al.* (2014b).

## 6.1 Metodología para estimar la amenaza sísmica

Para evaluar la amenaza sísmica, en este estudio se adoptan las metodologías propuestas por Budnitz *et al.* (1997), Reiter (1991) y McGuire (2004). El principal objetivo del análisis es estimar, en un sitio determinado, la probabilidad de excedencia de diferentes intensidades del movimiento del suelo, considerando todos los sismos que puedan ocurrir.

Entre los principales supuestos se encuentran los siguientes:

- La sismicidad en una región (o sitio) viene caracterizada por un grupo de fuentes sísmicas independientes, lo que significa que la ocurrencia de un evento en una fuente no afecta la probabilidad de ocurrencia de un evento en las otras fuentes.
- Cada fuente sísmica es capaz de generar rupturas (sismos) independientes; por lo tanto, la ocurrencia de una ruptura en una fuente no afecta la probabilidad de ocurrencia de otra potencial ruptura en la misma fuente sísmica.

### 6.1.1 Componentes del modelo de amenaza

Los principales componentes del modelo de amenaza sísmica son los siguientes:

- *Árbol lógico de fuentes sísmicas.* Corresponde a un conjunto de fuentes sísmicas caracterizadas por su ambiente tectónico, geometría y parámetros de sismicidad. El árbol lógico de fuentes consta principalmente de dos modelos (b1 y b2), creados según las alternativas consideradas en la definición y caracterización de las fuentes. Por ejemplo, en el modelo de sismicidad superficial se consideran tres tipologías de fuente: tipo área, fallas activas, o puntuales.

  Por otro lado, en el modelo de subducción, cambios en la definición de la geometría de las fuentes han sido utilizados para representar modelos alternativos y la incertidumbre epistémica asociada. En el capítulo 4 del presente estudio se presentan detalles sobre las fuentes sísmicas. En la tabla 33 se presenta un esquema del modelo de fuentes.
- *Árbol lógico de ecuaciones de atenuación.* Corresponde al conjunto de ecuaciones seleccionadas para cada ambiente tectónico (véase la tabla 34). Tales ecuaciones permiten estimar, en un sitio determinado, las intensidades del movimiento esperadas dada la ocurrencia de un sismo de una cierta magnitud y a una cierta distancia. Detalles de la selección de estas ecuaciones se presentan en el capítulo 5 del presente estudio.

**Tabla 33.** Modelo de fuentes sísmicas

| Tipo de fuente/modelo | Modelo (b1). Peso: 40 % | Modelo (b2). Peso: 60 % |
|---|---|---|
| Fuentes corticales | • Fuentes tipo falla (fallas activas)<br>• Modelo de sismicidad suavizada | Fuentes tipo área. Modelo de sismicidad equiprobable |
| Fuentes interplaca del proceso de subducción del Pacífico | • Fuentes complejas. Profundidad de fuentes: 50 km; no segmentado | Fuentes complejas. Profundidad de fuentes: 40 km; modelo segmentado |

(…/…)

| Tipo de fuente/modelo | Modelo (b1). Peso: 40 % | Modelo (b2). Peso: 60 % |
|---|---|---|
| Zona de Benioff (proceso de subducción del Pacífico) | Fuentes paramétricas. Profundidad de fuentes: 50 km | Fuentes paramétricas. Profundidad de fuentes: 40 km |
| Nido sísmico de Bucaramanga | Fuentes no paramétricas | Fuentes no paramétricas |

**Tabla 34.** Árbol lógico de ecuaciones de atenuación de cada ambiente tectónico

| Fuentes corticales (superficiales) | | | Subducción interplaca | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Ecuación de atenuación | Peso | ID | Ecuación de atenuación | Peso | ID |
| Idriss2014 (Idriss, 2014) | 0,399 | b11 | AbrahamsonEtAl2015SInter (Abrahamson *et al.*, 2016) | 0,437 | b31 |
| CauzziEtAl2014 (Cauzzi *et al.*, 2014) | 0,389 | b12 | ZhaoEtAl2006SInterNSHMP2008 (Zhao *et al.*, 2006) | 0,348 | b32 |
| AbrahamsonEtAl2014 (Abrahamson *et al.*, 2014) | 0,211 | b13 | MontalvaEtAl2016SInter (Montalva *et al.*, 2017) modificada | 0,215 | b33 |
| **Nido de Bucaramanga (intraplaca)** | | | **Benioff (intraplaca)** | | |
| Ecuación de atenuación | Peso | ID | Ecuación de atenuación | Peso | ID |
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 (Zhao *et al.*, 2006) | 0,443 | b21 | MontalvaEtAl2016SSlab (Montalva *et al.*, 2017) modificada | 0,424 | b41 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab (Abrahamson *et al.*, 2016) | 0,285 | b22 | AbrahamsonEtAl2015SSlab (Abrahamson *et al.*, 2016) | 0,365 | b42 |
| MontalvaEtAl2016SSlab (Montalva *et al.*, 2017) modificada | 0,272 | b23 | ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 (Zhao *et al.*, 2006) | 0,21 | b43 |

**Nota:** Los acrónimos de las ecuaciones de atenuación presentadas en la tabla 34 son referidos al motor de cálculo de OpenQuake.

### 6.1.2 Fuentes de incertidumbre en la evaluación de la amenaza sísmica

La naturaleza aleatoria de los procesos dinámicos asociados al origen de los sismos y a la propagación de sus ondas, sumada a la falta de datos y de conocimiento de tales procesos, limita la posibilidad de estimar de manera exacta las intensidades del movimiento del terreno cuando ocurren sismos. En este contexto, una evaluación probabilista es una alternativa para estimar valores esperados, así como rangos de variación de las intensidades del movimiento. Siguiendo este enfoque, las intensidades del movimiento se consideraron como una variable aleatoria, cuyas principales fuentes de incertidumbre se describen a continuación:

- *Incertidumbres aleatorias.* Corresponden a la variación de los datos que describen la ocurrencia de sismos y la intensidad del movimiento.
- *Incertidumbre en las tasas de ocurrencia de los sismos.* Como se señaló en el capítulo de fuentes sísmicas, de cada fuente se determina una distribución de recurrencia de magnitudes. Por otra parte, la ocurrencia de sismos se modela mediante una distribución de Poisson. De esta manera es posible estimar, en una fuente determinada, la probabilidad de ocurrencia de sismos de determinadas magnitudes en una ventana de tiempo específica.
- *Incertidumbre en la estimación de la intensidad del movimiento.* En términos generales, para las ecuaciones de atenuación seleccionadas se considera que la intensidad del movimiento es una variable aleatoria que sigue una distribución de probabilidad lognormal, descrita mediante un valor medio y una desviación estándar. De esta manera es posible calcular la probabilidad de que se exceda un determinado valor de intensidad del movimiento, dado que ocurre un sismo de ciertas características, como, entre otras, magnitud y distancia.
- *Incertidumbres epistémicas.* Corresponden a la falta de conocimiento en la modelación de la amenaza. Para enfrentar esta limitación se proponen diferentes alternativas a la hora de modelar las fuentes sísmicas, así como diferentes ecuaciones de atenuación para calcular la intensidad del movimiento. De la articulación del árbol lógico de fuentes con el árbol lógico de ecuaciones de atenuación se obtiene un conjunto de casos de análisis (realizaciones), para los cuales es posible estimar sus pesos respectivos (figura 81).

### 6.1.3 Evaluación de curvas de amenaza

Una curva de amenaza representa la probabilidad de que sea excedida una determinada aceleración espectral en un periodo de observación dado. La estimación de curvas de amenaza de un sitio determinado comprende los siguientes pasos:

*Identificación de casos de análisis.* Para una determinada ruptura, perteneciente a determinado ambiente tectónico, es posible utilizar diferentes ecuaciones de atenuación. Por ejemplo, para las fuentes corticales se pueden utilizar las ecuaciones b11, b12 y b12 (tabla 34).

Para un determinado sitio, una de las posibles realizaciones (casos de cálculo intensidades del movimiento) puede ser la que resulta del uso del modelo de fuentes b1, con las ecuaciones de atenuación b11 (superficial), b21 (nido de Bucaramanga), B31 (zona Benioff) y B41 (zona interplaca del Pacífico). El peso correspondiente a este caso de análisis es x1. xb11. xb21. xb31. xb41. Este caso corresponde a la primera rama de la figura 81.

Con el fin de considerar todos los casos posibles, las intensidades del movimiento se estiman en todo el conjunto de combinaciones que resultan entre ambientes tectónicos y ecuaciones de atenuación.

El número de realizaciones n (ramas del árbol lógico del cálculo de amenaza) correspondientes a un determinado sitio puede estimarse como $n = Mf \times At^{EA}$, en donde Mf es el número de ramas del modelo de fuentes (dos en este caso: b1, b2), At es el número de ambientes tectónicos que influyen en el cálculo de la amenaza y EA corresponde al número de ecuaciones de atenuación por cada ambiente tectónico. Por ejemplo, si en un punto influyen rupturas de tres ambientes tectónicos, considerando tres ecuaciones de atenuación por ambiente tectónico, el número de realizaciones que se obtiene es de $54 = 2*3^3$.

El número de ambientes y de fuentes que influyen en el cálculo de amenaza está sujeto a la distancia entre la localización de las rupturas y el sitio de análisis. En este sentido, es posible que se descarten rupturas muy lejanas que no tengan mayor influen-

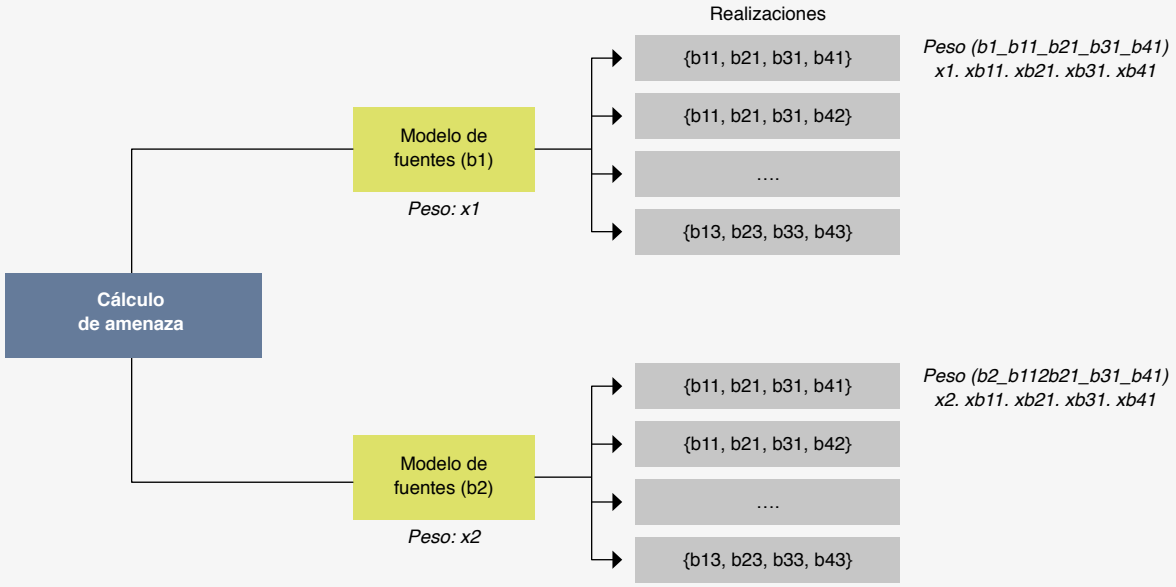



**Figura 81.** Realizaciones para la estimación de la amenaza sísmica

cia en el cálculo de las intensidades del movimiento. En caso de que existiera un solo modelo de fuentes y solo una ecuación de atenuación (según el ambiente tectónico), el procedimiento de cálculo resultaría más sencillo.

*Creación de un listado de rupturas.* A partir del árbol lógico de fuentes sísmicas se genera una lista de rupturas (sismos) acordes con los parámetros de sismicidad de tales fuentes. Asimismo, de cada ruptura se identifica su correspondiente probabilidad de ocurrencia, según la ventana de observación establecida en el análisis.

*Evaluación de la probabilidad de excedencia de intensidades del movimiento.* A partir de la lista de rupturas obtenidas en el paso anterior, y del árbol lógico de ecuaciones de atenuación, se calcula, para cada cada ruptura, intensidades del movimiento esperadas en el sitio de análisis.

Bajo el supuesto de independencia de las rupturas, y asumiendo que la ocurrencia de sismos sigue una distribución de Poisson, se estima la probabilidad de excedencia de intensidades del movimiento usando la expresión sugerida por Field *et al.* (2003), que se encuentra implementada en el motor de cálculo OpenQuake (Pagani *et al.*, 2014b):

$$P(X \geq x \mid t) = 1 - \prod_{i=1}^{I} \prod_{j=1}^{J} P(X \geq x \mid t) = (1 - P_{rupi,j}(n \geq 1 \mid t)^{P(X \geq x \mid rupi,j)} \quad [6.2]$$

En donde X corresponde al parámetro de intensidad del movimiento, $P_{rupi,j}(n \geq 1 \mid t)$ corresponde a la probabilidad de que ocurra al menos una ruptura j en la fuente i, en la ventana de observación t; $P(X \geq x \mid rupi,j)$ corresponde a la probabilidad de que el parámetro de intensidad sea mayor que un valor x dado que ocurre una ruptura j en la fuente i (según las ecuaciones de atenuación). Detalles sobre este procedimiento de cálculo se encuentran en Pagani *et al.* (2014b).

Las probabilidades de excedencia estimadas mediante la ecuación 6.2 corresponden a una realización según el modelo de fuentes sísmicas (utilizado para la generación de rupturas) y las ecuaciones de atenuación usadas en el cálculo de intensidades del movimiento. Así, con el fin de considerar todos los casos posibles, tales cálculos se ejecutan en el total de realizaciones descritas en la figura 81 y se ponderan según los pesos correspondientes.

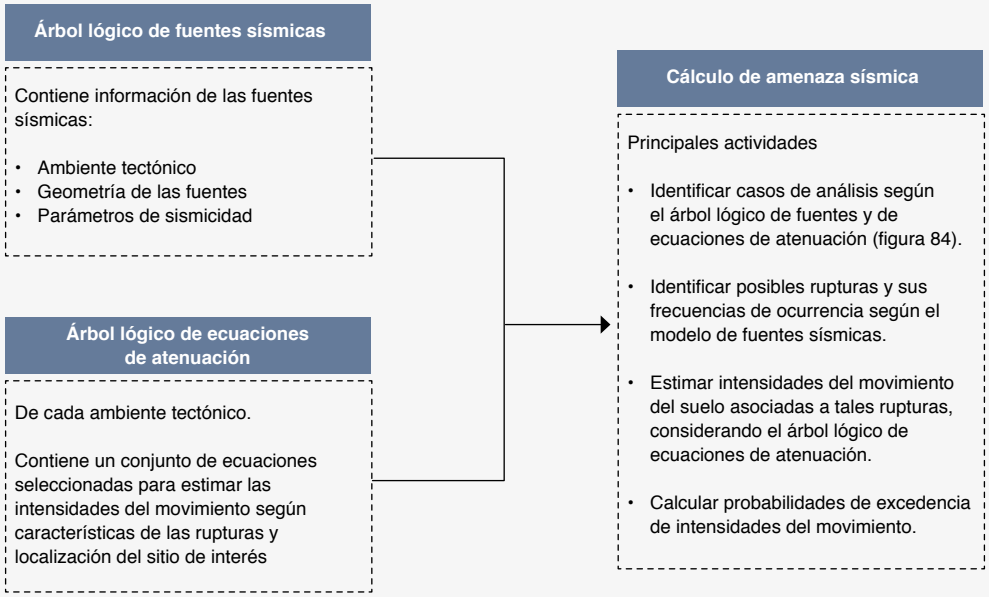



**Figura 82.** Componentes del cálculo del modelo de amenaza sísmica

Con este procedimiento es posible estimar el valor esperado, así como diferentes percentiles de las probabilidades de excedencia de la intensidad del movimiento. En particular, el valor esperado se puede obtener como la suma ponderada de los resultados de todas las realizaciones, considerando sus pesos correspondientes. La figura 82 presenta un esquema de los componentes y principales actividades del cálculo de probabilidades de excedencia del movimiento.

#### 6.1.4 Estimación de espectros de amenaza uniforme y mapas de amenaza

Los espectros de amenaza uniforme representan las aceleraciones espectrales esperadas, de diferentes periodos de vibración, considerando un determinado periodo de retorno, o probabilidad de excedencia en un tiempo determinado.

Los espectros de amenaza uniforme de un sitio particular pueden obtenerse con el siguiente procedimiento:

- Definir las condiciones del análisis: establecer una probabilidad de excedencia (PE). Por ejemplo, PE anual de 0,002105, que corresponde a un periodo de retorno de 475 años; determinar un conjunto de periodos de vibración {0s, 0,1 s, 0,2 s, ... n s} y de aceleraciones espectrales de interés {PGA, Sa (0,1 s), Sa (0,2 s) ... Sa (n s)}.
- Calcular las curvas de amenaza correspondientes a cada periodo de vibración.
- Consultar, en las curvas de amenaza obtenidas, los valores de las aceleraciones espectrales correspondientes a la probabilidad de excedencia (PE).

Por su parte, los mapas de amenaza representan las aceleraciones espectrales correspondientes a un conjunto de sitios de interés, calculadas considerando un determinado periodo de vibración T y una determinada PE. Así, los mapas de amenaza pueden generarse mediante el siguiente procedimiento:

Definir las condiciones del análisis: establecer un conjunto de sitios de análisis {s1 , s2, ..., sn}, una probabilidad de excedencia PE y un periodo de vibración T.

Para cada punto del análisis, calcular curvas de amenaza de la intensidad del movimiento (Sa (T)) deseada.

Para cada punto de análisis, consultar en la curva de amenaza respectiva, los valores de intensidad del movimiento (Sa (T)) correspondientes a la PE establecida.

### 6.2 Requerimientos computacionales

El Modelo Nacional de Amenaza Sísmica elaborado en colaboración entre el SGC y la Fundación GEM está compuesto por un conjunto de archivos en los que se definen los árboles lógicos de fuentes sísmicas y de ecuaciones de atenuación. Dichos archivos están organizados según los formatos establecidos para el cálculo de amenaza usando el motor de cálculo OpenQuake (versión 3.2). Estos insumos se encuentran disponibles al público para consulta mediante solicitud al SGC.

De cada fuente sísmica se cuenta con un archivo en el que se definen la geometría y los parámetros de sismicidad correspondientes. Tales parámetros se establecen según el tipo de fuente (puntual, tipo área, falla, fuente compleja y no paramétrica). Una descripción de los parámetros requeridos en cada tipo de fuente se encuentra en el capítulo 4. Mayores detalles sobre los archivos de configuración de fuentes sísmicas en el motor de cálculo OpenQuake se encuentran en GEM (2018).

Por otro lado, las ecuaciones de atenuación seleccionadas para el Modelo de Amenaza Sísmica de Colombia se encuentran programadas en el motor de cálculo OpenQuake. De esta manera, no hace falta definir tablas de parámetros o rutinas de cálculo adicionales. Las ecuaciones de atenuación implementadas en OpenQuake pueden consultarse en el repositorio de GEM (GEM s/f).

En análisis posteriores, y en caso de que se considere necesario, es posible incluir otras ecuaciones de atenuación con el fin de llevar a cabo el cálculo de intensidades del movimiento, siguiendo los formatos establecidos en el uso del motor de cálculo OpenQuake.

El cálculo de la amenaza sísmica nacional se puede realizar en computador de 64 bits, con ocho procesadores principales (16 procesadores lógicos) de 3,70 GHz de velocidad, con una memoria RAM de 32 GB. En un equipo de estas características, la estimación de curvas de amenaza de un tipo de intensidad del movimiento (por ejemplo, PGA), correspondiente a una malla de 7.500 sitios, como la que cubre el territorio colombiano, tiene una duración aproximada de 10 horas.

# 7

# Resultados del estudio de amenaza sísmica

El principal objetivo de este estudio es estimar las probabilidades de que, en un conjunto de puntos del país, se excedan determinadas intensidades del movimiento del terreno durante un periodo de exposición específico (por ejemplo, 50 años).

Para estimar dichas probabilidades de excedencia se elaboraron un árbol lógico de fuentes sísmicas y un árbol lógico de ecuaciones de atenuación. Mediante las fuentes sísmicas se busca caracterizar el territorio en términos de la distribución geográfica de los eventos sísmicos, la magnitud máxima que pueden generar y la frecuencia de ocurrencia de sismos según sus magnitudes. Por otro lado, las ecuaciones de atenuación son útiles para estimar las aceleraciones espectrales esperadas en el territorio ante la ocurrencia de sismos. Detalles de las fuentes sísmicas, de las ecuaciones de atenuación y de la metodología de cálculo de amenaza se presentan en los capítulos 4, 5 y 6, respectivamente.

En este capítulo se presentan los principales resultados de la evaluación de la amenaza sísmica nacional, en términos de mapas de aceleraciones pico correspondientes a diferentes periodos de retorno, curvas de amenaza, espectros de amenaza uniforme y desagregaciones de la amenaza.

## 7.1 Mapas de amenaza en roca firme

Los mapas de amenaza contienen las aceleraciones espectrales esperadas en un conjunto de puntos, correspondientes a un periodo de retorno establecido. Las figuras 83, 84 y 85 presentan aceleraciones pico (PGA) estimadas para periodos de retorno de 475, 975 y 2.475 años, respectivamente.

En términos generales, las anteriores figuras presentan una distribución geográfica similar en cuanto a las zonas en las que se esperan mayores aceleraciones en los periodos de retorno analizados. Se destacan el Pacífico colombiano, el eje cafetero, el borde llanero y los departamentos de Arauca, Norte de Santander y Santander. A

continuación se presentan algunas observaciones sobre la distribución de la amenaza en el territorio nacional.

### *Pacífico colombiano*

En la figura 83 se observa que, para un periodo de retorno de 475 años, los valores de PGA en su mayoría varían entre 0,4 y 0,6 g a una distancia cercana a 100 km de la costa pacífica. Los sitios de mayor PGA (0,6 y 0,9 g) se encuentran hacia el sur, en el departamento de Nariño (cerca de Tumaco, Francisco Pizarro y Mosquera) y hacia el noroccidente del departamento de Chocó (cerca de Bahía Solano). En zonas más alejadas de la costa pacífica (entre 100 y 200 km) se estiman aceleraciones en un rango entre 0,2 y 0,4 g.

Entre los eventos más relevantes que han ocurrido en el Pacífico colombiano se encuentran los sismos de 1906, de magnitud 8,8 Mw (cerca de Tumaco, a una profundidad de 20 km), y el de 1976, de magnitud 7,3 Mw (cerca de Bahía Solano, a 17,5 km de profundidad). Eventos de características similares han ocurrido en la costa ecuatoriana, tales como el sismo de 2016, de magnitud 7,8 Mw (cerca de Pedernales, a 20 km de profundidad). Estos eventos son ejemplos del potencial de generación de sismos de la subducción del Pacífico, así como de su contribución a la amenaza en dicha zona y de los cuantiosos daños que pueden ocasionar.

### *Eje cafetero*

En los departamentos del eje cafetero (Quindío, Caldas, Risaralda) localizados a más de 150 km de la costa pacífica se estiman aceleraciones que varían entre 0,15 y 0,3 g, en un periodo de retorno de 475 años. Entre los sismos más importantes que han ocurrido en esa zona se encuentran los de 1938 (7,0 Mw, a 150 km de profundidad), de 1962 (6,5 Mw, a 64 km de profundidad) y de 1999 (6,1 Mw, a 15 km de profundidad). Por su localización, se considera que en este sector son relevantes sismos tanto de Benioff como corticales.

### *Norte de Santander, Santander, Boyacá y Arauca*

En la figura 83 se observa que a menos de 25 km de la frontera con Venezuela, en los departamentos de Norte de Santander y Arauca, se estiman aceleraciones entre 0,4 y 0,6 g para un periodo de retorno de 475 años.

Entre los sismos más importantes que han ocurrido en esta zona se encuentran los de 1644, en Pamplona (magnitud de 6,5 Mw; profundidad de 15 km) y Cúcuta y Villa del Rosario, en 1875 (magnitud de 6,8 Mw; profundidad de 15 km). A una distancia de 25 a 50 km de la frontera con Venezuela se estiman aceleraciones entre 0,2 y 0,4 g. Y a una situada entre 50 y 200 km de tal frontera se estiman aceleraciones de hasta 0,2 g.

### *Borde llanero*

En las figuras 83, 84 y 85 se observa una franja sobre la cordillera Oriental en la cual se calculan aceleraciones relativamente altas si se comparan con las estimadas en el territorio nacional. En particular, considerando un periodo de retorno de 475 años, en la figura 83 se observa que dichas aceleraciones varían entre 0,2 y 0,3 g.

Entre los sismos más importantes que han ocurrido en esta zona se encuentran el de Villavicencio de 1917 (6,7 Mw; profundidad de 15 km), el de Tauramena en de 1995 (6,4 Mw, profundidad de 17 km), y el de Altamira de 1827 (7,1 Mw; profundidad de 15 km). De esta manera, se considera que los sismos de fuentes superficiales (corticales) pueden tener una significativa contribución a la amenaza de esta zona.

### *Costa atlántica, Llanos Orientales y Amazonia*

Comparativamente, zonas de la costa atlántica situadas al norte de los departamentos de Córdoba, Sucre, Bolívar, Atlántico, Magdalena y La Guajira enfrentan una menor amenaza. En estas zonas se calculan aceleraciones menores de 0,1 g, considerando un periodo de retorno de 475. Entre los eventos más relevantes que han ocurrido en esta zona se encuentra el sismo de Santa Marta de 1834 (Mw 6,4, con profundidad de 10 km).

Por otro lado, en las figuras 83, 84 y 85 se observa que, comparativamente, las zonas menos amenazadas se encuentran en la zona de Llanos Orientales, la Amazonia y parte de la Orinoquia, en los depar-

tamentos de Amazonas, Vaupés, Vichada, Guainía, Guaviare y Caquetá.

Las aceleraciones estimadas en estas zonas son menores de 0,05 g para un periodo de retorno de 475 años. La mayoría de los sismos ocurridos en esta región tienen magnitudes menores a 5,0 Mw. A pesar de que se han presentado eventos de magnitudes considerables, superiores a 7,0 Mw, éstos han ocurrido a profundidades mayores a 400 km, razón por la cual no causaron aceleraciones significativas en la superficie.

Al comparar los resultados entre los periodos de retorno de 475 años (figura 83), 975 años (figura 84) y 2.475 años (figura 85) se observa que, a medida que aumenta el periodo de retorno, la distribución geográfica de la amenaza se asemeja más a los trazos de las fallas activas consideradas en el modelo. Esta situación se puede observar sobre el trazo de las fallas de Oca, de Santa Marta, de Algarrobo, de Algeciras-Balsillas, y en las secciones de las fallas Guaicaramo y Yopal.

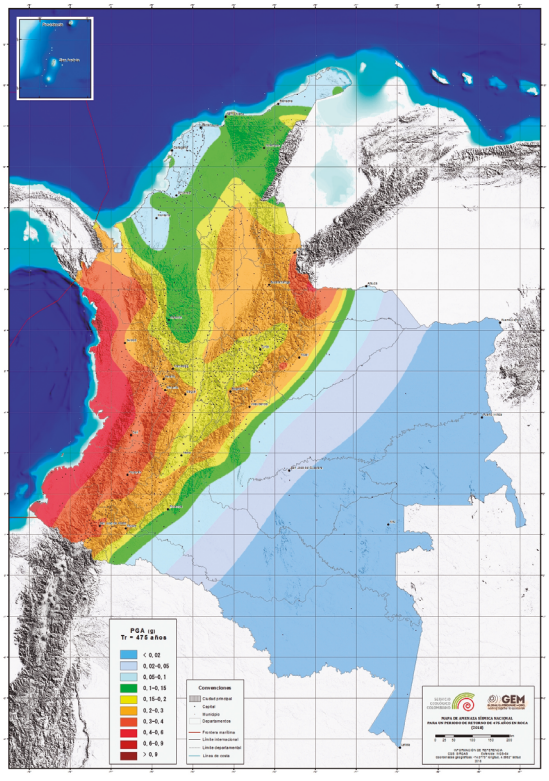


**Figura 83.** Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 475 años

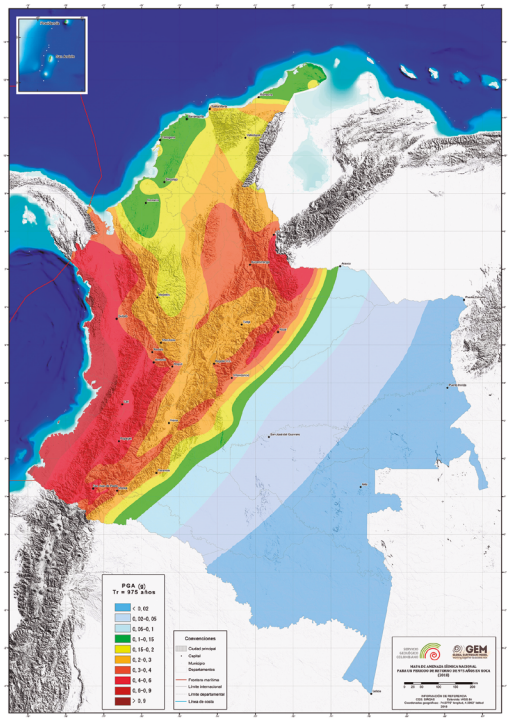


**Figura 84.** Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 975 años

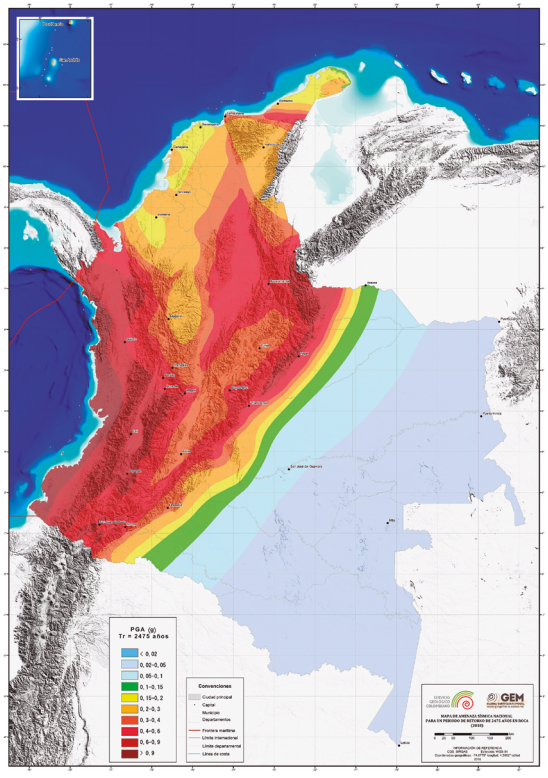


**Figura 85.** Mapa de aceleraciones pico. Periodo de retorno: 2.475 años

**Tabla 35.** Aceleración pico en roca estimada en capitales departamentales y para diferentes periodos de retorno

| Departamento | Municipio | Long. | Lat. | 225 | 475 | 975 | 2475 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Antioquia | Medellín | –75,58 | 6,25 | 0,10 | 0,14 | 0,20 | 0,30 |
| Atlántico | Barranquilla | –74,81 | 10,98 | 0,05 | 0,08 | 0,12 | 0,18 |
| Bogotá | Bogotá, D. C. | –74,11 | 4,65 | 0,13 | 0,19 | 0,27 | 0,40 |
| Bolívar | Cartagena de Indias | –75,50 | 10,38 | 0,05 | 0,07 | 0,11 | 0,18 |
| Boyacá | Tunja | –73,36 | 5,54 | 0,13 | 0,18 | 0,24 | 0,33 |
| Caldas | Manizales | –75,49 | 5,06 | 0,14 | 0,21 | 0,28 | 0,40 |
| Caquetá | Florencia | –75,61 | 1,62 | 0,10 | 0,15 | 0,22 | 0,33 |
| Cauca | Popayán | –76,60 | 2,46 | 0,23 | 0,32 | 0,44 | 0,63 |
| Cesar | Valledupar | –73,26 | 10,46 | 0,07 | 0,11 | 0,16 | 0,24 |
| Córdoba | Montería | –75,87 | 8,76 | 0,06 | 0,09 | 0,13 | 0,20 |
| Chocó | San Francisco de Quibdó | –76,64 | 5,68 | 0,20 | 0,30 | 0,41 | 0,61 |
| Huila | Neiva | –75,28 | 2,94 | 0,12 | 0,17 | 0,23 | 0,32 |
| La Guajira | Riohacha | –72,91 | 11,53 | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,23 |
| Magdalena | Santa Marta | –74,20 | 11,20 | 0,09 | 0,14 | 0,21 | 0,32 |
| Meta | Villavicencio | –73,62 | 4,12 | 0,14 | 0,23 | 0,35 | 0,57 |
| Nariño | San Juan de Pasto | –77,28 | 1,21 | 0,22 | 0,31 | 0,43 | 0,63 |
| Norte de Santander | Cúcuta | –72,51 | 7,91 | 0,21 | 0,30 | 0,41 | 0,60 |
| Quindío | Armenia | –75,68 | 4,54 | 0,20 | 0,29 | 0,40 | 0,57 |
| Risaralda | Pereira | –75,72 | 4,81 | 0,18 | 0,26 | 0,36 | 0,51 |
| Santander | Bucaramanga | –73,13 | 7,12 | 0,19 | 0,27 | 0,36 | 0,51 |
| Sucre | Sincelejo | –75,40 | 9,30 | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,21 |
| Tolima | Ibagué | –75,20 | 4,43 | 0,17 | 0,25 | 0,38 | 0,61 |
| Valle del Cauca | Santiago de Cali | –76,52 | 3,41 | 0,27 | 0,38 | 0,50 | 0,69 |
| Arauca | Arauca | –70,75 | 7,07 | 0,05 | 0,07 | 0,10 | 0,14 |
| Casanare | Yopal | –72,40 | 5,33 | 0,16 | 0,25 | 0,38 | 0,61 |
| Putumayo | Mocoa | –76,65 | 1,15 | 0,16 | 0,23 | 0,33 | 0,49 |
| San Andrés y Providencia | San Andrés | –81,71 | 12,58 | 0,05 | 0,09 | 0,14 | 0,23 |
| Amazonas | Leticia | –69,94 | –4,20 | <0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,03 |
| Guainía | Puerto Inírida | –67,92 | 3,87 | <0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 |
| Guaviare | San José del Guaviare | –72,64 | 2,57 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,06 |
| Vaupés | Mitú | –70,23 | 1,25 | <0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 |
| Vichada | Puerto Carreño | –67,49 | 6,19 | <0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,03 |

Estos resultados están relacionados con la definición de magnitudes máximas más altas en el modelo de las fallas activas y sismicidad distribuida, que las asignadas a las fuentes de sismicidad equiprobable (véase la sección 4.3.2.3). De esta manera, a medida que se aumenta el periodo de retorno hay una mayor contribución de las fallas activas a la amenaza.

Como referencia, la tabla 35 presenta las aceleraciones pico estimadas en puntos ubicados en las capitales departamentales, considerando periodos de retorno de 225, 475, 975 y 2.475 años.

### 7.1.1 Relaciones entre las aceleraciones pico obtenidas con diferentes periodos de retorno

La figura 86 presenta el cociente entre las aceleraciones pico estimadas para periodos de retorno de a) 975 años, y b) 2.475 años, respecto a las estimadas para un periodo de retorno de 475 años.

En la figura 86 se observa que tales razones varían en el territorio y que están relacionadas con la sismicidad. En las zonas de menor amenaza del país, como la Amazonia, la razón entre las aceleraciones pico puede ser del orden de dos veces considerando un periodo de retorno (Tr) de 975 años, y del orden de cuatro veces considerando un Tr de 2.475 años. Por su parte, en las zonas de mayor amenaza, como el departamento de Nariño, tales relaciones pueden ser del orden de 1,4 a dos veces teniendo en cuenta periodos de retorno de 975 y 2.475 años, respectivamente.

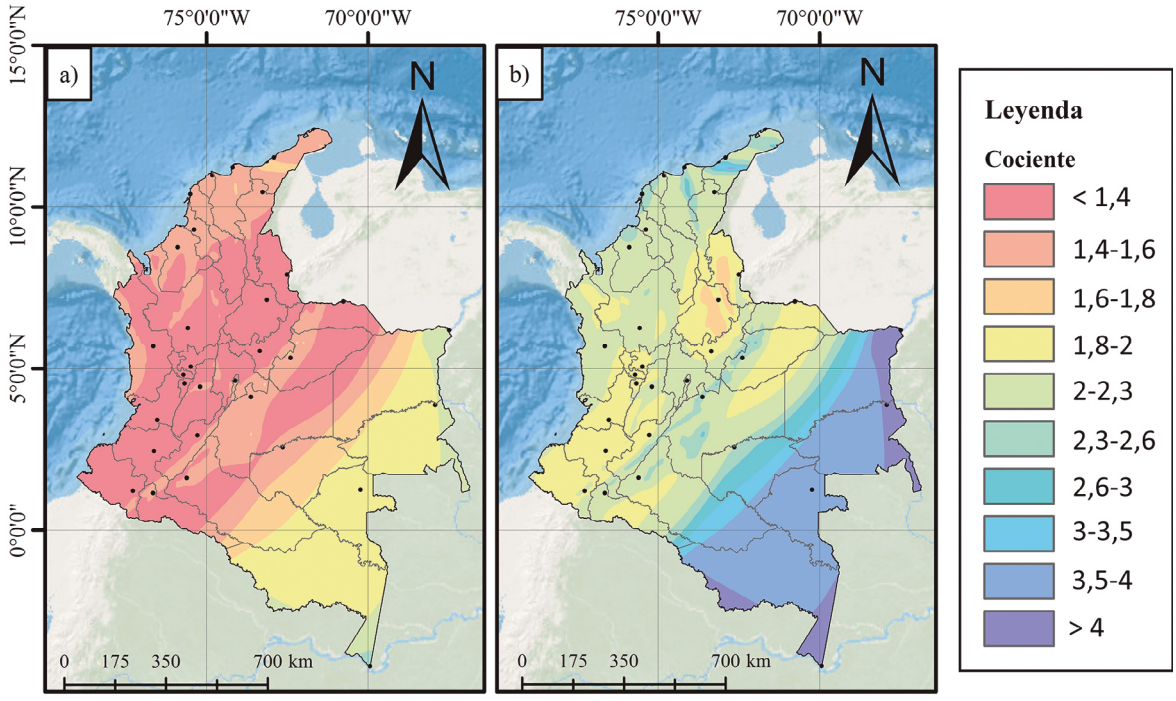



**Figura 86.** Cociente entre aceleraciones pico correspondientes a diferentes periodos de retorno: a) 975/475; b) 2.475/475

### 7.1.2 Ambientes tectónicos predominantes en la evaluación de la amenaza sísmica

Con el fin de tener una mayor comprensión de los resultados, se realizaron estimaciones de la amenaza sísmica en cada ambiente tectónico, considerando los árboles lógicos de ecuaciones de atenuación correspondientes. Los valores medios obtenidos se compararon entre sí con el fin de identificar los ambientes tectónicos que producen las aceleraciones más altas en el territorio. La figura 87 presenta la distribución geográfica de los ambientes tectónicos que generan los mayores valores de aceleración pico (PGA) considerando un periodo de retorno de 475 años.

A partir de la figura 87 se presentan las siguientes observaciones:

- Las fuentes interplaca (del modelo unido y segmentado) producen las aceleraciones pico más altas en la zona Pacífico. Hacia el norte, esta zona tiene una extensión cercana a 200 km desde la costa pacífica, y abarca el departamento de Chocó. Hacia el sur, en los departamentos de Nariño y Cauca, esta zona se extiende a menos de 50 km de la costa pacífica.
- Las fuentes tipo Benioff son relevantes para los departamentos de Nariño, Cauca y Valle, e incluso llegan hasta Quindío, en una zona contigua a la de sismos interplaca. También se observan zonas de mayores aceleraciones de esta fuente hacia la zona central del departamento de Putumayo.
- El nido sísmico de Bucaramanga contribuye en mayor medida a la amenaza sísmica del noroccidente del departamento de Norte de Santander y el sur del departamento de Santander.
- Al norte de La Guajira y sobre las cordilleras Central y Oriental se observa que las mayores aceleraciones corresponden a fuentes de los modelos de sismicidad distribuida y de fallas activas.
- El modelo de fuentes superficiales de sismicidad equiprobable produce las mayores aceleraciones en la costa atlántica, en los Llanos Orientales y parte de la Orinoquia, en el eje cafetero y gran parte de los departamentos de Antioquia y Tolima.

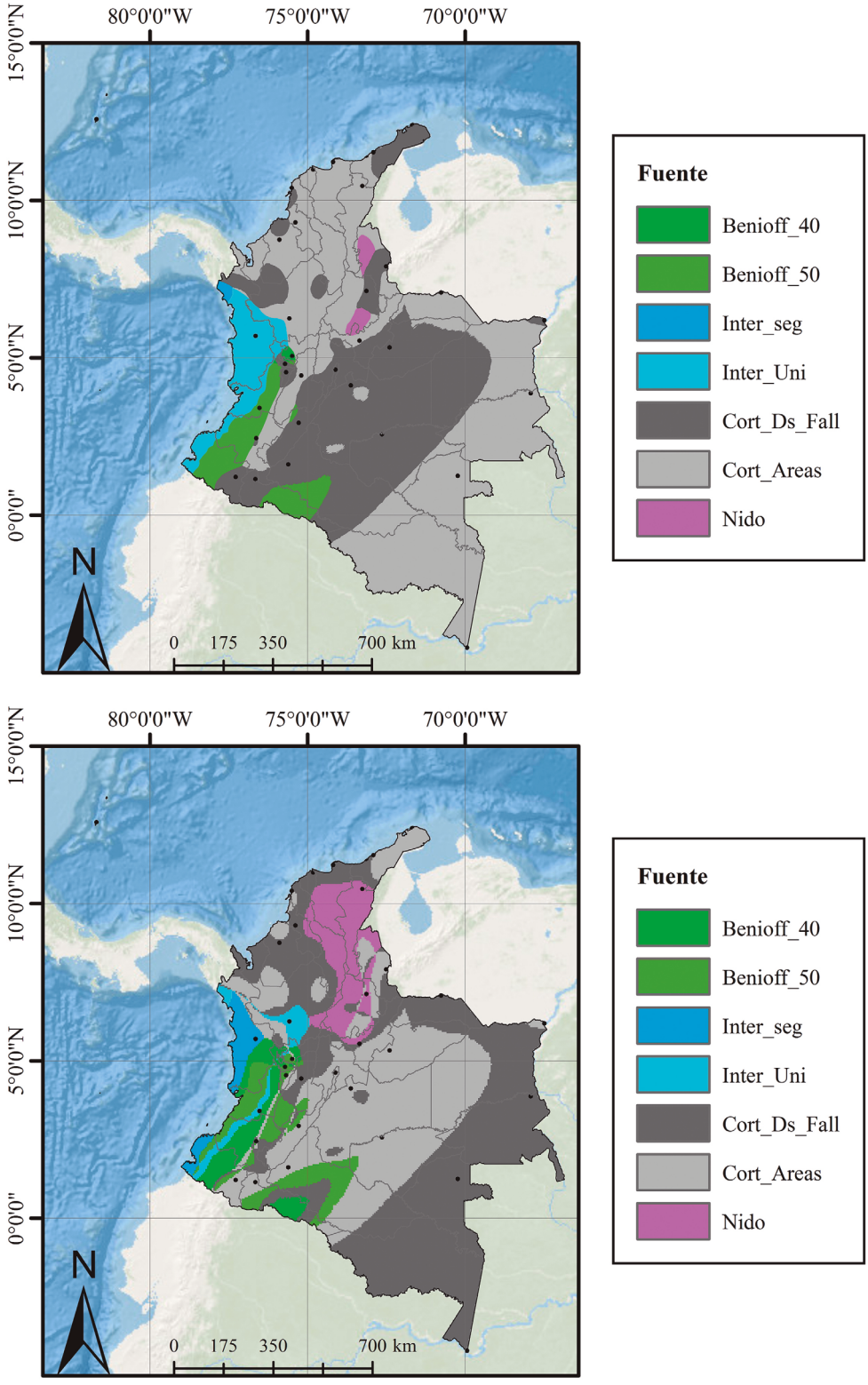



**Figura 87.** Ambiente tectónico de mayor aceleración pico (periodo de retorno de 475 años)

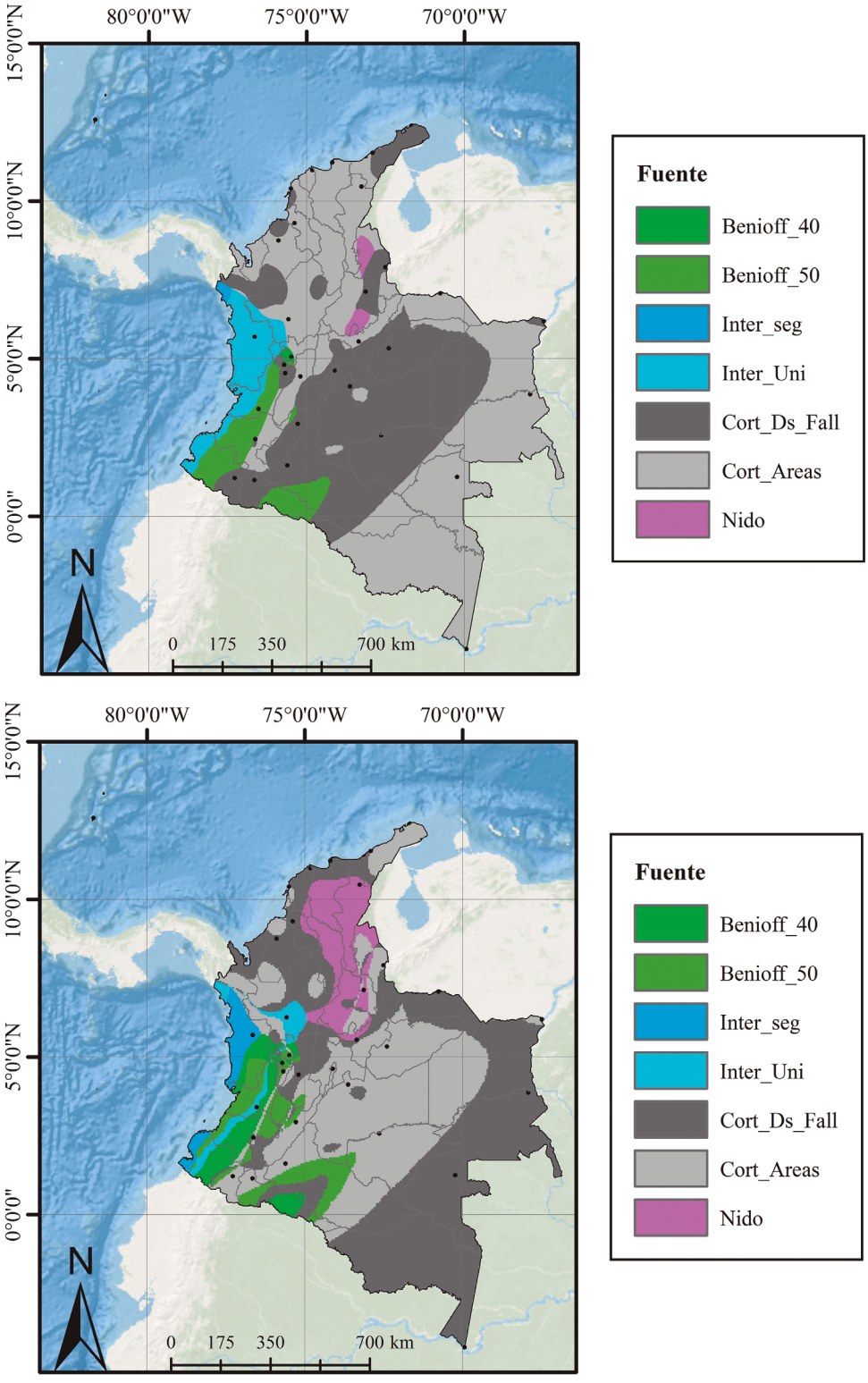



**Figura 88.** Ambiente tectónico de segunda mayor aceleración pico (Tr 475 años)

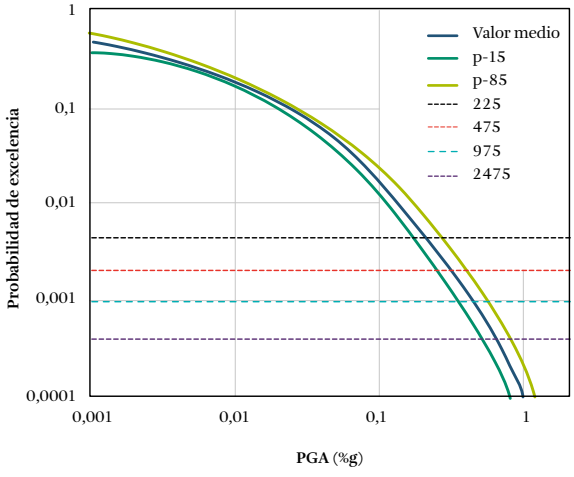
Como complemento al anterior análisis, la figura 88 presenta los ambientes de segunda mayor aceleración pico. A partir de esta figura se presentan las siguientes observaciones:

- El modelo de sismicidad equiprobable se complementa con el modelo de sismicidad distribuida y fallas activas.
- Las fuentes interplaca del modelo segmentado generan menores aceleraciones que las del modelo unido.
- Las fuentes de tipo Benioff, interplaca y superficiales son relevantes para los municipios del eje cafetero.
- Las fuentes de tipo Benioff son relevantes para los departamentos de Cauca, Valle y Tolima.

## 7.2 Curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme

La evaluación de la amenaza sísmica se ha realizado en una malla de puntos regular, así como en las localizaciones de centros poblados del país. En cada punto se encuentran curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme correspondientes a periodos de retorno de 475 y 2.475 años. La figura 89 presenta ejemplos de estos resultados en un punto del municipio de Pasto. En el anexo K se presentan los espectros de amenaza uniforme obtenidos para las principales capitales del país.

**a)**




**b)**

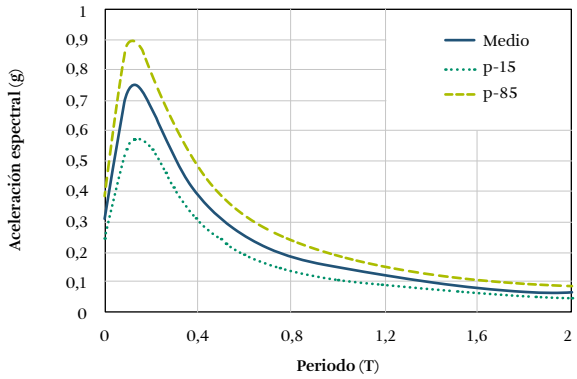



**Figura 89. a)** Curva de amenaza; **b)** espectro de amenaza uniforme (Tr. 475 años) correspondiente a un punto del municipio de Pasto

Estos resultados, sumados a mapas de amenaza con periodos de retorno de 31, 225, 475, 975 y 2.475 años se encuentran disponibles en el sitio de consulta del modelo de amenaza (SGC, 2018). Detalles del sistema de consulta se encuentran en el anexo L.

## 7.3 Desagregación de la amenaza sísmica

A partir del modelo elaborado es posible realizar un análisis de desagregación de la amenaza, útil para identificar el tipo de sismos de mayor contribución a la amenaza sísmica de un sitio determinado.

Con la metodología descrita en Pagani *et al.* (2014b), el análisis de desagregación se realiza teniendo en cuenta un determinado periodo de retorno, para el cual se estiman las probabilidades de excedencia de un rango de valores de intensidad del movimiento, considerando diferentes propiedades de los sismos, como su magnitud, distancia respecto al sitio de análisis, ambiente tectónico y localización geográfica de las rupturas que pueden generarse.

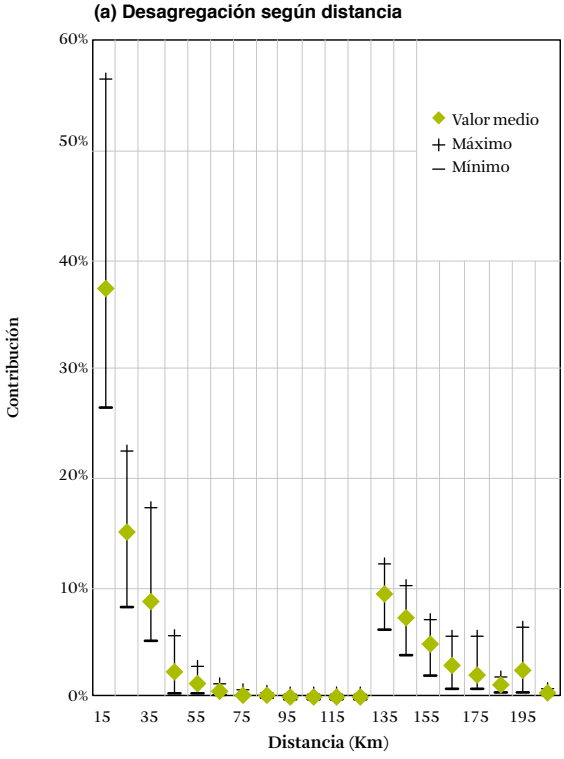
A continuación se describen ejemplos del tipo de resultados del análisis de desagregación. La figura 90 presenta resultados sobre el municipio de Pasto (Colombia) en cuanto a la contribución a la amenaza según la distancia y magnitud de las rupturas. Considerando que para el cálculo de la amenaza se obtiene un conjunto de realizaciones según el árbol lógico de ecuaciones de atenuación y de fuentes sísmicas, es posible calcular un rango de valores, así como el valor

esperado de la contribución según distancia y magnitudes de las rupturas.

La figura 91 presenta resultados del análisis de desagregación según el ambiente tectónico y el periodo de vibración, teniendo en cuenta periodos de retorno de 475 y 975 años. Por último, la figura 92 presenta la distribución geográfica de la contribución de las rupturas a la amenaza sísmica de Popayán según ambientes tectónicos a) corticales, b) interplaca y c) zona Benioff, considerando aceleraciones pico (PGA) de un periodo de retorno de 475 años.

Los resultados del análisis según distancias, magnitudes y ambientes tectónicos son relevantes para la selección de registros acelerográficos que sean de interés tanto para el análisis del comportamiento estructural como para el análisis de respuesta dinámica de suelos.

A la vez, estos resultados son útiles para la definición del tipo de sismos y de escenarios de daño en la formulación de planes de respuesta por terremoto.



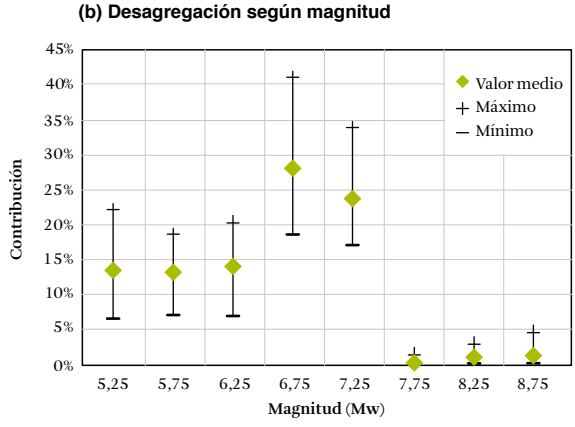




**Figura 90.** Desagregación de la amenaza sísmica en Pasto según **a)** distancia y **b)** magnitud de las rupturas (TR 475, PGA)

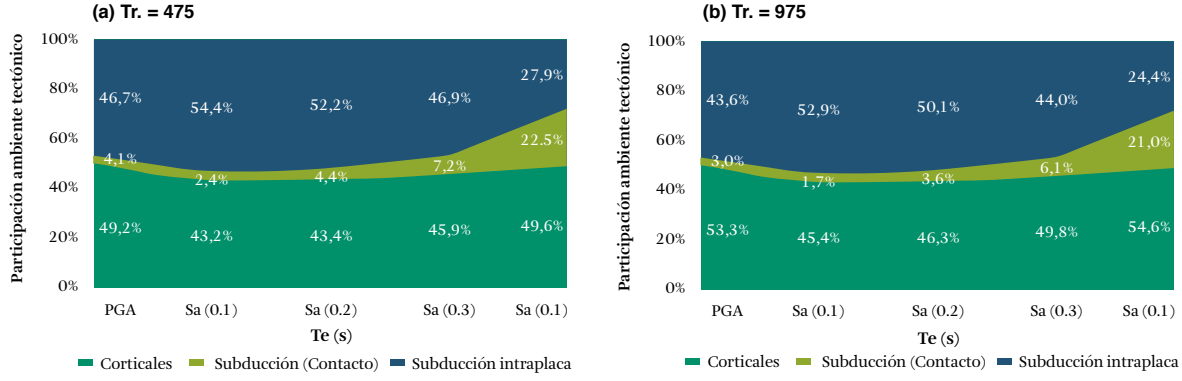
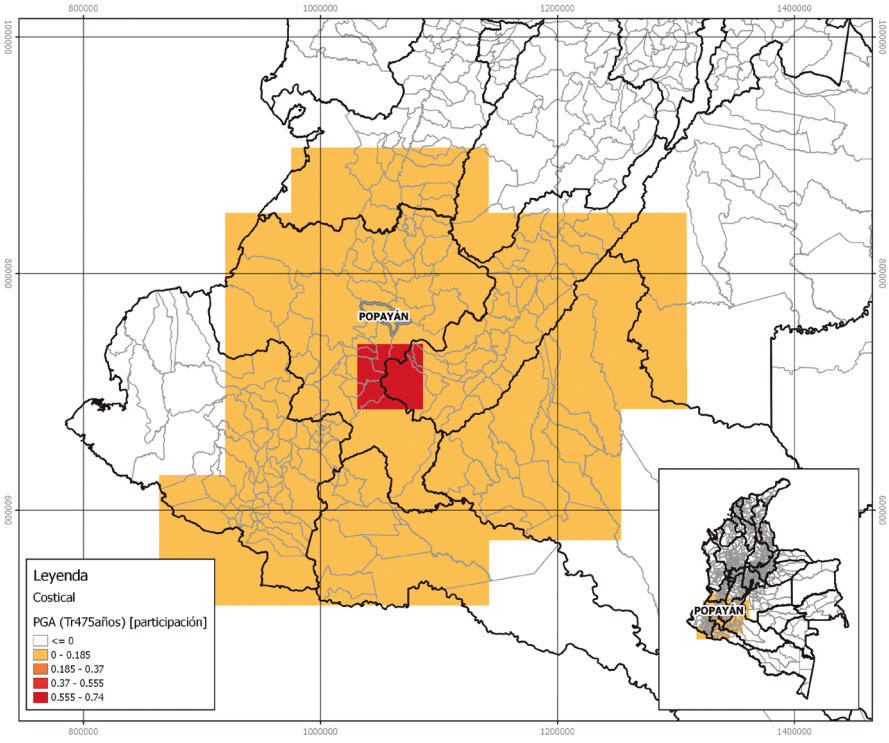
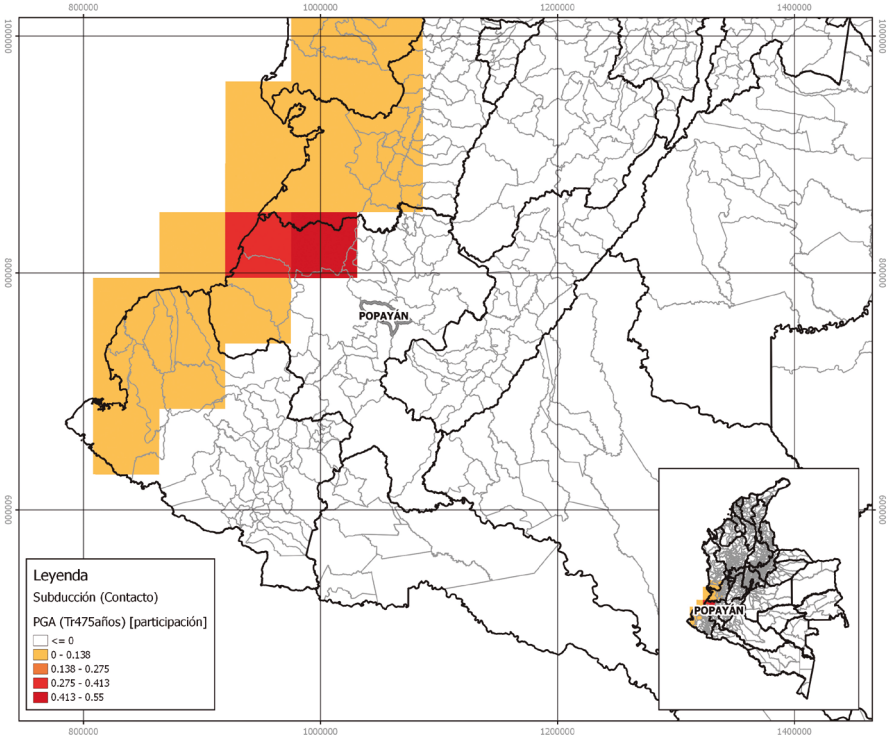



**Figura 91.** Resultados de la desagregación de la amenaza sísmica en Popayán según ambientes tectónicos y periodos de vibración de **a)** Tr. = 475 años y **b)** 975 años

**(a) Corticales**




**(b) Subducción, interplaca (contacto)**



**(c) Zona Benioff**

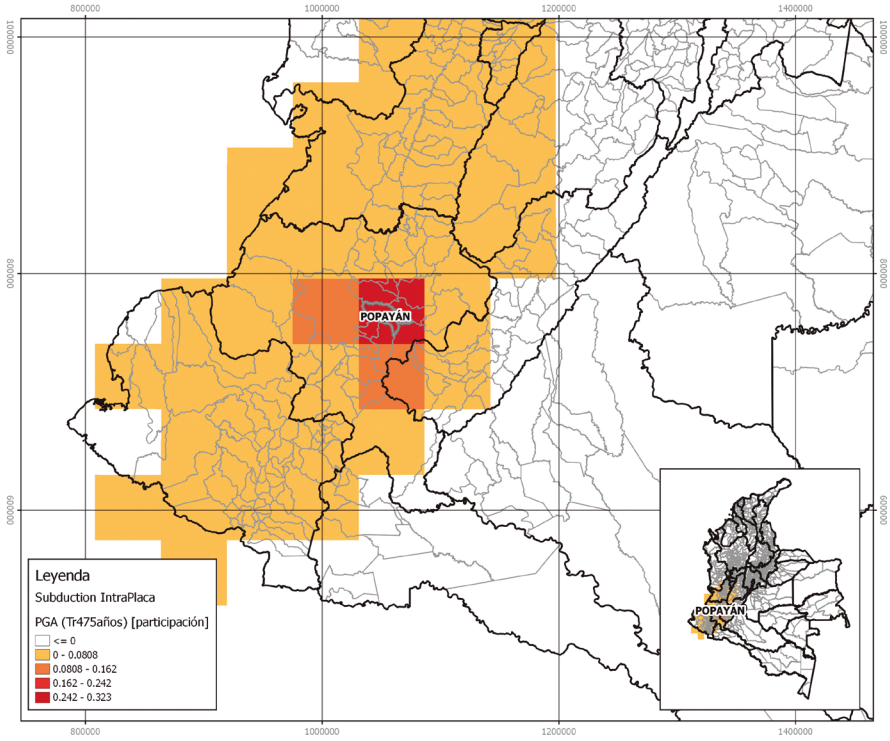



**Figura 92.** Distribución geográfica de la contribución de las rupturas a la amenaza sísmica de Popayán según ambientes tectónicos **a)** corticales, **b)** interplaca y **c)** zona Benioff. Periodo de retorno: 475 años

# 8

# Conclusiones y recomendaciones

En Colombia diferentes instituciones han realizado estimaciones de amenaza sísmica. Entre los resultados más relevantes se resaltan los modelos utilizados para definir los coeficientes sísmicos que se han adoptado en las normas y reglamentos de sismorresistencia (García *et al.*, 1984; AIS *et al.*, 1996; AIS, 2009). En estos modelos se han realizado esfuerzos dirigidos a construir un catálogo de eventos, describir fuentes sísmicas y seleccionar ecuaciones de atenuación.

Partiendo de estos avances, el Servicio Geológico Colombiano, en conjunto con la Fundación Global Earthquake Model, elaboró un modelo con el fin de contribuir al conocimiento de la amenaza sísmica nacional. De esta colaboración se destacan las siguientes actividades:

***Conjunto de datos básicos:***

- Elaboración de un catálogo sísmico a partir de la compilación y procesamiento de diferentes catálogos globales y nacionales.

***Modelo de fuentes sísmicas:***

- Consideración de información y criterios geológicos, tectónicos y sismológicos en la definición de la geometría de fuentes sísmicas.
- Elaboración de modelos de sismicidad distribuida y de sismicidad equiprobable para el análisis de fuentes corticales.
- Caracterización de fallas activas para la modelación de fuentes sísmicas superficiales desde un punto de vista tectónico.

***Ecuaciones de atenuación:***

- Evaluación y selección de ecuaciones de atenuación que mejor representen las intensidades del movimiento observadas según los diferentes ambientes tectónicos.

***Resultados:***

- Divulgación del modelo y de los resultados de la amenaza sísmica mediante sistemas de consulta abiertos al público.

En este capítulo se presentan los principales productos y conclusiones del modelo elaborado por la colaboración del SGC y la GEM.

## 8.1 Conjunto de datos básicos

### *Catálogo Sísmico Integrado*

Se elaboró un catálogo sísmico integrado (CSI) a partir de la recopilación de información de múltiples fuentes, la depuración de eventos repetidos y la homogeneización de sus magnitudes.

Con este propósito se consultó información de los siguientes catálogos globales y nacionales:

- EHB (Engdahl *et al.*, 1998)
- ISC-GEM (Di Giacomo *et al.*, 2014; Storchak *et al.*, 2013),
- Centennial (Engdahl y Villaseñor, 2002)
- International Seismological Centre (ISC) (Bondár y Storchak, 2011)
- Global Centroid Moment Tensor Catalog (GCMT) (Storchak *et al.*, 2013)
- ANNS Composite (ANSS)
- (NCEDC, 2013)
- ANSS Comprehensive (NEIC) (USGS, 2014);
- Centro Internacional de Datos (IDC) (ISC, 2015).
- Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Colombia)
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica (IGEPN) (Ecuador) (Beauval *et al.*, 2013)
- Centro Sismológico de América Central (CASC) (Alvarenga *et al.*, 1998)
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (Ineter, 2016)
- Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (Funvisis) (Venezuela).

*Depuración de eventos repetidos.* Se establecieron criterios de priorización de la información contenida en los catálogos consultados, con el fin de identificar la información preferida de cada uno, previendo el caso de que un sismo se encontrara reportado en dos o más catálogos.

*Homogeneización de magnitudes.* La magnitud de los eventos del CSI se encuentra expresada en términos de la magnitud momento (Mw). Con este fin se estimaron relaciones usando valores de Mw estimados a partir de M0 (reportado por el GCMT por medio del tensor de momento). También se consideraron los valores de mb y Ms estimados por el NEIC y presentados por el GCMT en los mismos eventos que cuentan con magnitud Mw.

Como resultado de este proceso, el CSI cuenta con un total de 34.681 eventos, ocurridos a partir de 1610, cuyas magnitudes varían entre 2,9 y 8,8 Mw. Teniendo en cuenta que en el desarrollo del CSI se utilizaron eventos de bases de datos globales y nacionales, el CSI contiene información de una adecuada cobertura geográfica y temporal.

El catálogo de eventos es una herramienta relevante para definir los parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas identificadas. Dado que en el presente estudio se supone que los eventos son independientes, se realizó una remoción de eventos dependientes utilizando el algoritmo de Gardner y Knopoff (1974). También se realizó un análisis de periodos de completitud de magnitudes utilizando la metodología de Stepp (1972).

### *Base de datos de movimiento fuerte*

Se consolidaron 1.786 registros (triaxiales) de 118 sismos, que fueron procesados para corregir la línea base. También se recopiló información de los eventos en términos de su ubicación, magnitud y mecanismo focal de acuerdo con las soluciones estables del catálogo GCMT.

**Tabla 36.** Descripción general de los eventos de la base de datos de movimiento fuerte

| Ambiente tectónico | Mecanismos focales predominantes | N.º de registros | Profundidad promedio (km) | Rango Mw |
|---|---|---|---|---|
| Cortical | Strike-slip | 607 | 25 | 4,8-7 |
| Nido | Compuesto | 485 | 147 | 4,8-6,25 |
| Benioff | | 435 | 131 | 4,8-7,3 |
| Interplaca | Inverso | 259 | 22 | 5-7,8 |

Los eventos se clasificaron en los siguientes ambientes tectónicos: corteza activa (cortical), interplaca (subducción en la costa pacífica), intraplaca (zona de Benioff y nido sísmico de Bucaramanga). La tabla 36 presenta una descripción general de los eventos de la base de datos de movimiento fuerte.

Además de la compilación y el procesamiento de los registros acelerográficos, se realizó una base de datos de caracterización de efectos de sitio de las estaciones que abarca los siguientes parámetros: profundidades en las que se encuentran velocidades de onda cortante (Vs) de 1 y 2,5 km/s ($Z_1$ y $Z_{2,5}$, respectivamente), así como el promedio de la velocidad de onda de corte para los 30 metros más superficiales del suelo ($Vs_{30}$).

Tal caracterización es fundamental, ya que permite incluir posibles efectos de sitio en la comparación entre las aceleraciones espectrales calculadas mediante ecuaciones de atenuación y las observadas en los registros acelerográficos. De esta manera, la caracterización de las estaciones contribuye a que la amenaza sísmica se calcule en roca firme, depurando posibles efectos de sitio (teniendo en cuenta las limitaciones de los parámetros $Vs_{30}$, $Z_{1,0}$ y $Z_{2,5}$). Esta diferenciación según efectos de sitio tiene mayor incidencia en la estimación de aceleraciones espectrales en periodos intermedios y altos (mayores de 0,75 s).

#### *Base de datos de fallas activas*

Se revisó una base de datos de fallas activas a partir de experiencias previas regionales y nacionales. En total se compiló información de 171 estructuras, de las que se determinó información sobre sus características geométricas y geodinámicas, con las cuales es posible obtener parámetros relevantes para evaluar la amenaza sísmica.

Las características geométricas se definieron a partir del ángulo de buzamiento promedio, la dirección del buzamiento, la dirección del bloque hundido de la falla y la geometría de la falla en formato WKT (Well-Known Text).

Por su parte, las características geodinámicas se definieron a partir del tipo de movimiento cinemático predominante, la tasa de deslizamiento anual (total), la tasa de deslizamiento anual (en la dirección del rumbo), la tasa de deslizamiento anual (vertical), la tasa de deslizamiento anual (horizontal) y el ángulo de deslizamiento de la falla (*rake*).

De esta manera, la base de datos de fallas activas representa un avance en la estandarización y el aprovechamiento de la información geológica para el cálculo de la amenaza sísmica.

### 8.2 Modelo de fuentes sísmicas

La sismicidad de Colombia se clasificó en los siguientes ambientes tectónicos: i) sismos superficiales (corticales), de profundidad menor de 30 km, distribuidos a lo largo del territorio nacional; ii) sismos interplaca, localizados en la costa pacífica, en el contacto de las placas Nazca y Suramérica; iii) sismos intraplaca (Benioff), que ocurren en el interior de la placa de Nazca, en el volumen que subduce a la placa Suramérica, y (iv) el nido sísmico de Bucaramanga.

En cada ambiente se definió un conjunto de fuentes sísmicas, que se describieron en términos de su geometría y de su actividad. En la modelación de las fuentes se consideraron las siguientes alternativas:

- En fuentes corticales, un modelo de fuentes tipo área (de sismicidad equiprobable) y un modelo compuesto de sismicidad distribuida y de fallas activas.
- En fuentes interplaca (subducción) e intraplaca (zona Benioff) se consideraron variaciones en la profundidad y en la geometría de la fuente.

#### *Geometría de las fuentes*

La geometría de las fuentes corticales tipo área se definió a partir de un procedimiento que comprende un análisis de la estructura de la corteza terrestre, información geológica de la superficie e información de sismicidad histórica e instrumental. Este procedimiento facilita la justificación y documentación tanto de los datos como de los criterios geológicos, tectónicos y sismológicos utilizados en la definición de los límites geográficos de fuentes corticales.

En el modelo de sismicidad distribuida se delinearon nueve macrozonas, que corresponden a la agrupación de fuentes tipo área de ambientes sismotectónicos similares. Por otra parte, a partir de la base de datos de fallas activas se definieron las trazas y demás propiedades geométricas de las fallas.

Para la definición de la geometría de las fuentes de subducción (interplaca) y de Benioff se elaboraron secciones transversales a lo largo de la trinchera del Pacífico. Sobre esas secciones se identificó la localización y la profundidad de los sismos ocurridos. A partir de esta información se infirió tanto la extensión como la variación en profundidad de la placa subducente. Un procedimiento similar se llevó a cabo para definir la geometría del nido sísmico de Bucaramanga.

Con este procedimiento es posible evaluar de forma más realista la amenaza sísmica de fuentes de subducción e intraplaca, pues se tienen en cuenta las variaciones en la profundidad de los sismos, acordes con la interacción de las placas tectónicas.

Considerando que existe incertidumbre en la definición de la profundidad en la que terminan los sismos interplaca y comienzan los de la zona de Benioff, se establecieron dos alternativas geométricas de tales fuentes, variando dicha profundidad entre 40 y 50 km.

Adicionalmente, para la modelación de fuentes de subducción se consideraron dos casos: uno en el que la fuente corresponde a un único volumen en la costa pacífica, así como un modelo segmentado, en el que la subducción se divide en tres volúmenes, cada uno descrito por diferentes parámetros de sismicidad. Esta última aproximación permite un mayor detalle en la distribución geográfica y de magnitudes de los sismos que se pueden generar en la zona de subducción.

### *Parámetros de sismicidad*

La actividad de las fuentes sísmicas (con excepción de las fallas activas) se determinó mediante distribuciones de recurrencia de magnitudes, que se obtuvieron utilizando el CSI depurado (sin réplicas).

La actividad sísmica de las fallas activas se determinó a partir de información geológica, considerando relaciones entre la productividad de la falla (número de terremotos promedio entre la magnitud mínima y máxima) y la tasa de liberación de momento total, representado por la tasa de deslizamiento anual.

Con este enfoque, en la estimación de la actividad de fuentes superficiales es posible tener en cuenta el potencial de ocurrencia de sismos de magnitudes considerables (por ejemplo, superiores a 6,5 Mw) que, a pesar de no estar registrados en catálogos de eventos históricos, han sido identificados mediante el reconocimiento geológico de las fallas activas. De esta manera, el análisis de amenaza se enriquece con los datos geológicos.

### *Árbol lógico de fuentes sísmicas*

El modelo de fuentes sísmicas se resume en un árbol lógico (tabla 37 ). Dicho árbol contiene las diferentes alternativas de modelación de las fuentes, así como sus pesos correspondientes. Tales pesos representan el grado de creencia que los autores conceden a cada alternativa.

**Tabla 37.** Resumen del árbol lógico de fuentes sísmicas

| Tipo de fuente/modelo | Modelo (b1.) Peso: 40 % | Modelo (b2). Peso: 60 % |
|---|---|---|
| Fuentes corticales | • Fuentes tipo falla (fallas activas).<br>• Modelo de sismicidad suavizada | • Fuentes tipo área. Modelo de sismicidad equiprobable |
| Fuentes interplaca del proceso de subducción del Pacífico | • Profundidad de fuentes: 50 km; modelo no segmentado | • Profundidad de fuentes: 40 km; modelo segmentado |
| Zona de Benioff (proceso de subducción del Pacífico) | Profundidad de fuentes: 50 km | Profundidad de fuentes: 40 km |
| Nido sísmico de Bucaramanga | Igual en los dos modelos | |

## 8.3 Ecuaciones de atenuación

Las ecuaciones de atenuación son un componente importante en la modelación de la amenaza sísmica, ya que permiten estimar los valores de las intensidades del movimiento que se esperan en el territorio en caso de ocurrencia de sismos. Por lo tanto, es relevante utilizar ecuaciones con las cuales se obtenga un buen ajuste respecto a las intensidades del movimiento observadas en sismos ocurridos en el país.

Con este fin, en cada ambiente tectónico se llevó a cabo una preselección de ecuaciones disponibles en la bibliografía. Sobre esta preselección se llevaron a cabo procedimientos de evaluación para identificar, de manera cuantitativa, el ajuste entre las ecuaciones de atenuación y las aceleraciones espectrales registradas en la base de datos de movimiento fuerte.

Los procedimientos de evaluación adoptados fueron los siguientes: análisis de residuales (Stafford *et al.*, 2008), modelo de verosimilitud (LH) (Scherbaum *et al.*, 2004), modelo del logaritmo de verosimilitud normalizado (LLH) (Scherbaum *et al.*, 2009) y ranking basado en la distancia euclidiana (Kale y Akkar, 2013).

A partir de los métodos de evaluación mencionados se identificaron las tres ecuaciones de mejor ajuste. Utilizando el parámetro LLH se determinaron los pesos correspondientes de cada una (tabla 38). Por simplicidad, se utilizó un peso promedio en todas las ordenadas espectrales.

Dado que el proceso de selección de ecuaciones de atenuación se llevó a cabo utilizando metodologías reconocidas en publicaciones científicas y que se utilizó la base de datos de movimiento fuerte elaborada para este estudio, se considera que el resultado es objetivo, verificable y reproducible, lo que garantiza la transparencia del análisis. De esta manera, las ecuaciones seleccionadas responden a los datos disponibles y a los procedimientos adoptados. También se resalta el uso de ecuaciones del estado del conocimiento ("de nueva generación"), en las que se incorporan efectos de sitio.

**Tabla 38.** Resumen del árbol lógico de ecuaciones de atenuación

| Fuentes corticales (superficiales) | | Subducción, interplaca | |
|---|---|---|---|
| **Ecuación de atenuación** | **Peso** | **Ecuación de atenuación** | **Peso** |
| Idriss2014 (Idriss, 2014) | 0,399 | AbrahamsonEtAl2015SInter (Abrahamson *et al.*, 2016) | 0,437 |
| CauzziEtAl2014 (Cauzzi *et al.*, 2014) | 0,389 | ZhaoEtAl2006SInterNSHMP2008 (Zhao *et al.*, 2006) | 0,348 |
| AbrahamsonEtAl2014 (Abrahamson *et al.*, 2014) | 0,211 | MontalvaEtAl2016SInter (Montalva *et al.*, 2017) modificada | 0,215 |
| **Nido de Bucaramanga (intraplaca)** | | **Benioff (intraplaca)** | |
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 (Zhao *et al.*, 2006) | 0,443 | MontalvaEtAl2016SSlab (Montalva *et al.*, 2017) modificada | 0,424 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab Abrahamson *et al.* (2016) | 0,285 | AbrahamsonEtAl2015SSlab (Abrahamson *et al.*, 2016) | 0,365 |
| MontalvaEtAl2016SSlab (Montalva *et al.*, 2017) modificada | 0,272 | ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 (Zhao *et al.*, 2006) | 0,21 |

## 8.4 Resultados

Siguiendo una metodología probabilista se obtuvieron curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme (para diferentes percentiles), así como mapas de amenaza sísmica considerando periodos de retorno de 475, 975 y 2.475 años. Tales resultados se generaron teniendo en cuenta una malla de puntos que cubren el territorio nacional. Los resultados del análisis se encuentran disponibles en SGC (2018).

En términos generales, en los mapas de amenaza obtenidos se observan mayores aceleraciones espectrales en el Pacífico colombiano, en el eje cafetero, el borde llanero y en los departamentos de Arauca, Norte de Santander y Santander. Tales zonas corresponden

a los sectores de los que se tienen registros históricos de eventos destructivos, tales como el de Tumaco de 1906 (magnitud 8,8 Mw), el del Eje Cafetero, en 1999 (magnitud 6,1 Mw) y el de Cúcuta y Villa del Rosario, en 1875 (magnitud 6,8 Mw).

Las zonas con las menores aceleraciones espectrales estimadas se encuentran en la Amazonia y en parte de la Orinoquia, en los departamentos de Amazonas, Vaupés, Vichada, Guainía, Guaviare y Caquetá. De estas regiones no se tienen registros de eventos que hayan afectado a la población o la infraestructura.

Los resultados del modelo de amenaza sísmica están determinados por la geometría, localización y parámetros de actividad de las fuentes sísmicas. Dado que tales parámetros dependen del catálogo depurado de sismos, los mapas de amenaza son consistentes con la distribución geográfica de la sismicidad. Esta conclusión, a pesar de que pueda resultar obvia, resalta la importancia del trabajo realizado en la construcción del CSI y en la caracterización de las fuentes sísmicas.

## 8.5 Recomendaciones

A partir de la colaboración del SGC y de la Fundación GEM se desarrolló un modelo y se realizaron cálculos de la amenaza sísmica en el territorio nacional. Dado el alcance geográfico y las limitaciones de conocimiento, se recomienda que el modelo y los resultados se utilicen como valores de referencia (a nivel de factibilidad) para actividades relacionadas con la gestión del riesgo sísmico a escala nacional y regional. No se recomienda hacer uso de esta información para el diseño de proyectos de infraestructura específica, ya que los resultados del presente estudio no corresponden a coeficientes sísmicos de diseño aplicables a cualquier edificio o infraestructura.

Considerando las limitaciones del conocimiento, así como las metodologías y supuestos adoptados, se reconoce que pueden existir diferentes casos de análisis y modelos de amenaza, que pueden conducir a diferentes resultados. El presente estudio ofrece una alternativa de modelación soportada en bases de datos de diferente naturaleza, que fueron procesados con herramientas y metodologías novedosas. Así, cada usuario está en potestad de elegir tanto el modelo como los resultados de amenaza que a su juicio sean de mayor pertinencia para sus fines.

El modelo y los resultados se encuentran disponibles en el sitio de consulta difundido por el SGC (SGC, 2018), de tal manera que cualquier actor interesado puede utilizarlos. Sobre su uso, el personal técnico del SGC está disponible para atender inquietudes, así como para recibir sugerencias y recomendaciones que sirvan para complementar, actualizar y mejorar los resultados.

Sobre los insumos y procedimientos de modelación de la amenaza sísmica, se resalta la importancia del trabajo realizado en colaboración por el SGC y la GEM para desarrollar bases de datos de diferente índole que sirvieron de soporte a la modelación. En este sentido, se recomienda continuar promoviendo, desde un enfoque multidisciplinario, crítico y de datos abiertos, la compilación, depuración, procesamiento y análisis de datos de catálogos sísmicos, fallas activas, registros acelerográficos e información geológica y tectónica, entre otras fuentes de información, a partir de las cuales se puedan tomar decisiones relativas a la modelación de la amenaza sísmica.

En este sentido, el SGC invita a los centros de investigación, académicos y expertos en la modelación de la amenaza sísmica a contribuir, desde diferentes disciplinas, al conocimiento de la amenaza sísmica que enfrenta el país. De esta manera se busca que, en un ambiente técnico de colaboración y coordinación, que el país cuente con el mejor conocimiento posible de este tipo de amenaza, teniendo en cuenta que el fin último de esta información es la seguridad de la población, de las construcciones y de la infraestructura.

## Referencias


Abrahamson, N. y Silva, W. (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 67-97. http://dx.doi.org/10.1193/1.2924360.

Abrahamson, N., Silva, W. J. y Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1025-1055. http://dx.doi.org/10.1193/070913EQS198M.

Abrahamson, N., Gregor, N. y Addo, K. (2016). BC hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32 (1), 23-44. http://dx.doi.org/10.1193/051712EQS-188MR.

AIS, Uniandes e Ingeominas. (1996). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Comité AIS-300.

AIS. (2009). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia (2009)*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Comité AIS-300.

Aki, K. y Richards, P. G. (1980). *Quantitative seismology*. Vols. I y II. San Francisco: Freeman.

Akkar, S. y Bommer, J. (2006). Influence of long-period filter cut-off on elastic spectral displacements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35 (9), 1145-1165. http://dx.doi.org/10.1002/eqe.577.

Akkar, S. y Cagnan, Z. (2010). A local ground motion predictive model for Turkey, and its comparison with other regional and global ground motion models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 10 (6), 2978-2995. http://dx.doi.org/10.1785/0120090367.

Akkar, S., Sandikkaya, M. y Bommer, J. (2014). Empirical ground-motion models for point and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 359-387. http://dx.doi.org/10.1007/s10518-013-9461-4.

Al Atik, L. y Youngs, R. R. (2014). Epistemic uncertainty for NGA-West2 models. *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1301-1318. https://doi.org/10.1193/062813EQS173M.

Albini, P., Musson, R., Gómez Capera, A., Locati, M., Rovida, A., Stucchi, M. y Vigano, D. (2013). *Global historical earthquake archive and catalogue (1000-1903)*. GEM Technical Report 2013-01 V1.0.0. Pavía, Italia: G. Foundation, Ed. http://dx.doi.org/10.13117/GEM.GEGD.TR2013.01.

Alvarenga, E., Barquero, R., Boschini, I., Escobar, J. y Fernández, M. (1998). Central American Seismic Center (CASC). *Seismological Research Letters*, 69 (5), 394-399. https://doi.org/10.1785/gssrl.69.5.394.

Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S. y Donahue, J. L. (2013). "PEER NGA-West2 Database". USA.

Anderson, J. G. y Luco, J. E. (1983). Consequences of slip rate constraints on earthquake recurrence relations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73 (2), 471-496.

Ansari, A., Firuzi, E. y Etemadsaeed, L. (2015). Delineation of seismic sources in probabilistic seismic-hazard analysis using fuzzy cluster analysis and monte Carlo Simulation. *Bulletin of the Seismological Society of America,* 105 (4), 2174-2191. https://doi.org/10.1785/0120140256.

Arcila M. y Dimaté, C. (2005). *Caracterización de fuentes sísmicas: estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali.* Informe n.° 1-6. Bogotá: Ingeominas y Dagma.

Arcila, M., García Mayordomo, J. y López, M. C. (2017, septiembre). Modelo de zonas sismogénicas para la evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Ponencia presentada en el XVI Congreso Colombiano de Geología. Santa Marta, Colombia, 1540-1543.

Audemard, F., Machette, M., Cox, J., Dart, R. y Haller, K. (2000). Map and database of Quaternay faults in Venezuela and its offshore regions. *USGS Open File Report* 00-018, 78.

Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font y Vaca, S. (2013). An earthquake catalog for seismic hazard assessment

in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103 (2A), 773-786. https://doi.org/10.1785/0120120270.

Benito, M. B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquín, G., Molina, E. W., Rojas, W., Escobar, J. J., Talavera, E., Alvarado, G. E. y Torres, Y. (2012). A new evaluation of seismic hazard for the Central America region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102 (2), 504-523. http://dx.doi.org/10.1785/0120110015.

Bernal, G. (2014), *Metodología para la modelación, cálculo y calibración de parámetros de la amenaza sísmica para la evaluación probabilista del riesgo* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña.

Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R. y Augliera, P. (2014). Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the Resorce dataset. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 391-430. https://doi.org/10.1007/s10518-013-9525-5.

Bondár, I. y Storchak, D. (2011). Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophysical Journal International*, 186 (3), 1220-1244. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x.

Boore, D. M. y Atkinson, G. M. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 99-138. http://dx.doi.org/10.1193/1.2830434.

Boore, D. M. (2010). Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100 (4), 1830-1835. http://dx.doi.org/10.1785/0120090400.

Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E. y Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1057-1085. http://dx.doi.org/10.1193/070113EQS184M.

Bormann, P., Liu, R., Xu, Z., Zhang, L. y Wendt, S. (2009). First application of the new Iaspei teleseismic magnitude standards to data of the China National Seismographic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99 (3), 1869-1891. https://doi.org/10.1785/0120080010.

Budnitz, R. J., Apostalakis, G., Boore, D. M., Cluff, L. S., Coppersmith, K. J., Cornell C. A. y Morris, P. A. (1997). Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: Guidance on uncertainty and use of experts. Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC). U. S. Nuclear Regulatory Commission U. S. Department of Energy Electric Power Research Institute. NUREG/CR-6372 UCRL-ID-122160. Vol. 1.

Campbell, K. W. (1997). Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seismological Research Letters*, 68 (1), 154-179. https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.154.

Campbell, K. y Borzognia, Y. (2007). NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. PEER Report No. 2007/02, 238. Berkeley, California, USA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California.

Campbell, K. W. y Borzognia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1087-1115. http://dx.doi.org/10.1193/062913EQS175M.

Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M. y Bianchini, A. (2014). Updated predictive equations for broadband (0.01-10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bulletin of Earth-*

*quake Engineering*, 13, 1587-1612. http://dx.doi.org/10.1007/s10518-014-9685-y.

Cepal. (1999). El terremoto de enero de 1999 en Colombia: impacto socioeconómico del desastre en la zona del eje cafetero. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, sede subregional en México. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Colombia.

Chen, Y.-S., Weatherill, G., Pagani, M. y Cotton, F. (2018). A transparent and data-driven global tectonic regionalization model for seismic hazard assessment. *Geophysical Journal International*, 213 (2), 1263-1280. http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggy005.

Chiarabba, C., De Gori, P., Faccenna, C., Speranza, F., Seccia, D., Dionicio, V. y Prieto, G. A. (2016). Subduction system and flat slab beneath the Eastern Cordillera of Colombia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17 (1), 16-27. http://dx.doi.org/10.1002/2015GC006048.

Chiou, B. S.-J. y Youngs, R. (2008). An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 173-215. https://doi.org/10.1193/1.2894832

Chiou, B. S.-J. y Youngs, R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1117-1153. https://doi.org/10.1193/072813EQS219M.

Condori Quispe, C. y Pérez, J. L. (2015). Análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en el Valle del Cauca, suroccidente de Colombia. *GEOS*, 35 (2), 1-16.

Cornell, A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America,* 58 (5), 1583-1606.

Costa, C., Audemard, F., Bezerra, H., Lavenu, A., Machette, M. y Paris, G. (2006). An overview of the main Quaternary deformation of South America. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61 (4), 461-479.

Cotton, F., Scherbaum, F., Bommer, J. J. y Bungum, H. (2006). Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: Application to Central Europe and rock sites. *Journal of Seismology*, 10, 137-156. http://dx.doi.org/10.1007/s10950-005-9006-7.

CSN. (s/f). Sismicidad y terremotos en Chile. Centro Sismológico Nacional. Universidad de Chile. Diponible en http://www.csn.uchile.cl/wp-content/uploads/2014/06/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf

Di Giacomo, D., Bondár, I., Storchak, D., Engdahl, R., Bormann, P. y Harris, J. (2014.). ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009), III. Re-computed Ms and mb, proxy Mw, final composition and completeness assessment. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 239, 33-47. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.005.

Dobry, R., Borchedt, R. D., Crouse, C. B., Idriss, I. M., Joyner, W. B., Martin, G. R. y Seed, R. B. (2000). New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. *Earthquake Spectra*, 16 (1). https://doi.org/10.1193/1.1586082.

Donovan, N. C. (1973). Earthquake hazards for buildings in building practices for disaster mitigation. *National Bureau of Standards*, 46, 82-111.

Douglas, J. (2018). *Ground motion prediction equations, 1965-2018*. Glasgow: University of Strathclyde.

Dziewonski, A. M., Chou, T.-A. y Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 86 (B4), 2825-2852, http://dx.doi.org/10.1029/JB086iB04p02825.

Egüez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M., Costa, C. y Dart, R. (2003). Database and map of quaternary faults and folds in Ecuador and its offshore region. *United States Geological Survey Open-File Report*, 2003-289. https://doi.org/10.3133/ofr03289.

Ekström, G., Nettles, M. y Dziewonski, A. M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200-201, 1-9. http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002.

Engdahl, E., Van der Hilst, R. y Buland, R. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88 (3), 722-743.

Engdahl, E. y Villaseñor, A. (2002). Global Seismicity: 1900-1999. En W. Lee, H. Kanamori, P. Jenning y C. Kisslinger, *International handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, A(41), 665-690.

Eraso, J. y Montejo, J. (2019) "Cálculo del promedio de velocidad de onda de corte a 30 metros de profundidad (Vs30) en Colombia como una aproximación a la estimación de los efectos sísmicos de sitio a escala nacional" Servicio Geológico Colombiano (SGC). 27 páginas.

Estrada Uribe, G. y Ramírez, J. (1977). *Mapa de riesgo sísmico. Instituto Geofísico*. A. M. Bogotá: Universidad Javeriana.

Faccioli, E. y Cauzzi, C. (2008). Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *Journal of Seismology*, 12, 453-475. http://dx.doi.org/10.1007/s10950-008-9098-y.

Faccioli, E., Bianchini, A. y Villani, M. (2010). New ground motion prediction equations for T>1 s and their influence on seismic hazard assessment. *Proceedings of the University of Tokyo Symposium on Long-Period Ground Motion and Urban Disaster Mitigation*. Tokyo, Japan.

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodríguez, E., Roth, L. y Seal, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, 45 (2), http://dx.doi.org/10.1029/2005RG000183.

Field, E. H., Jordan, T. H. y Cornell, C. A. (2003). OpenSHA: A developing community modeling environment for seismic hazard analysis. *Seismological Research Letters*, 74 (4), 406-419. https://doi.org/10.1785/gssrl.74.4.406.

Frankel, A. (1995). Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters*, 66 (4), 8-21. https://doi.org/10.1785/gssrl.66.4.8.

Gallego, M. (2000). *Estimación del riesgo sísmico en la República de Colombia* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.

García, D., Singh, S. K., Herraiz, M., Ordaz, M. y Pacheco, J. F. (2005). Inslab earthquakes of Central Mexico: Peak groundmotion parameters and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95 (6), 2272-2282. https://doi.org/10.1785/0120050072.

García, D., Wald, D. J. y Hearne, M. G. (2012). A global earthquake discrimination scheme to optimize ground-motion prediction equation selection. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102 (1), 185-203. http://dx.doi.org/10.1785/0120110124.

García, J., Weatherill, G., Pagani, M., Rodríguez, L., Poggi, V. y SARA Hazard Working Group (2017, enero). *Building an open seismic hazard model for South America: The SARA-PSHA model*. Ponencia presentada en la *16th World Conference on Earthquake, 16WCEE* 2017, Santiago, Chile.

García, L. E., Sarria, A., Espinosa, S. A., Bernal, C. E. y Puccini, M. (1984). Estudio general del riesgo sísmico de Colombia. *Boletín Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*, 28.

García Mayordomo, J. (2015). *Creación de un modelo de zonas sismogénicas para el cálculo del mapa de peligrosidad sísmica de España*. Instituto Geológico y Minero de España.

Gardner, J. K. y Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64 (5), 1363-1367.

GCMT. (2017). Global CMT web page. Disponible en http://www.globalcmt.org/

GEM. (2018). *The OpenQuake-engine user manual. Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.2.0*. http://dx.doi.org/10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.2.0.

GEM. (s/f). Global Earthquake Model Repositories. oq-engine. Disponible en https://github.com/gem/oq-engine/tree/master/openquake/hazardlib/gsim

Getsinger, J. S. y Hickson, C. J. (2000). Multinational Andean Project (MAP): Geological co-operation across borders. *Geoscience Canada*, 27 (3). Disponible en https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/4049

Ghofrani, H. y Atkinson, G. M. (2014). Ground-motion prediction equations for interface earthquakes of M7 to M9 based on empirical data from Japan. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 549-571. http://dx.doi.org/10.1007/s10518-013-9533-5.

Gutenberg, B. y Richter, C. F. (1954). *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. Princeton: Princeton University Press.

Hainzl, S., Scherbaum, F. y Beauval, C. (2006). Estimating background activity based on interevent-time distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (1), 313-320, http://dx.doi.org/10.1785/0120050053.

Hayes, G. P., Wald, D. J. y Johnson, R. L. (2012). Slab1.0 A three-dimensional model of global subduction zone geometries. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117 (B1). https://doi.org/10.1029/2011JB008524

Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M. y Smoczyk, G. M. (2018). Slab2, A comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, 362 (6410), 58-61. http://dx.doi.org/10.1126/science.aat4723.

Heuret, A., Lallemand, S., Funiciello, F., Piromallo, C. y Faccenna, C. (2011). Physical characteristics of subduction interface type seismogenic zones revisited. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12 (1), 1-26, http://dx.doi.org/10.1029/2010GC003230.

Heuret, A., Losq, J. y Lallemand, S. (2015). SubMAP (Subduction database). Disponible en http://submap.gm.univ-montp2.fr/

Hutton, K., Woessner, J. y Hauksson, E. (2010). Earthquake monitoring in southern California for seventy-seven years (1932-2008). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100 (2), 423-446. http://dx.doi.org/10.1785/0120090130.

Idriss, I. (2014). An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1155-1177. http://dx.doi.org/10.1193/072813EQS219M.

IGEPN. (s/f). Descarga de datos. Disponible en https://www.igepn.edu.ec/solicitud-de-datos/formulario-descarga-de-datos.

IGEPN. (2016). Observaciones del sismo del 16 de abril de 2016 de magnitud Mw 7.8: intensidades y aceleraciones. Quito, Ecuador.

IGEPN. (2018). Reporte de las réplicas del 18 de mayo de 2016. Aceleraciones. Quito, Ecuador.

Ineter. (2016). Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Disponible en http://www.ineter.gob.ni/

Ingeominas y Universidad Nacional de Colombia. (2010). Mapa nacional de amenaza sísmica. Periodo de retorno: 475 años. Disponible en https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=-BusquedaPredefinida=DGAMapNacAmenSismic1500K

ISC. (s/fa). ISC-GEM Catalogue/download and legal. Disponible en http://www.isc.ac.uk/iscgem/download.php

ISC. (s/fb). Reviewed ISC Bulletin. Disponible en http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/review/.

ISC. (s/fc). Bulletin of the International Seismological Centre. Disponible en http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/

ISC. (2012). International Seismological Centre, EHB Bulletin. Disponible en http://www.isc.ac.uk/ehbbulletin/ (consultado el 4 de diciembre de 2015).

ISC. (2015). International Seismological Centre (ISC), Annual 2015 Director's Report. Report, International Seismological Centre.

Kaklamanos, J., Baise, L. G. y Boore, D. M. (2011). Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice. *Eartquake Spectra*, 27 (4), 1219-1235.

Kale, O. y Akkar, S. (2013). A new procedure for selecting and ranking ground-motion prediction equations (GMPES): The euclidean distance-based ranking (EDR) method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103 (2A), 1069-1084. http://dx.doi.org/10.1785/0120120134.

Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. y Fukushima, Y. (2006). A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (3), 879-897. http://dx.doi.org/10.1785/0120050138.

Kaverina, A., Lander, A. y Prozorov, A. (1996). Global creepex distribution and its relation to earthquake-source geometry and tectonic origin. *Geophysical Journal International*, 125 (1), 249-265. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06549.x.

Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Koper, K. D., Hutko, A. R., Ye, L., Yue, H. y Rushing, T. M. (2012). Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults. *Journal of Geophysical Research*, 117 (B4). http://dx.doi.org/10.1029/2011JB009133.

Laske, G., Masters, G., Ma, Z. y Pasyanos, M. (2013). Update on CRUST1.0 - A 1-degree global model of Earth's crust. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU 2013-2658.

Leonard, M. (2010). Earthquake fault scaling: Relating rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100 (5A), 1971-1988. https://doi.org/10.1785/0120090189.

Leonard, M. (2014). Self-consistent earthquake fault-scaling relations: Update and extension to stable continental strike-slip faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104 (6), 2953-2965. http://dx.doi.org/10.1785/0120140087.

Lin, P.-S. y Lee, C.-T. (2008). Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in Northeastern Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98 (1), 220-240. http://dx.doi.org/10.1785/0120060002.

MAVDT. (2010). Ley 400 de 1997 (modificada por la Ley 1229 de 2008 y el Decreto 19 de 2012), Decreto 926 del 19 de marzo de 2010, por medio del cual se adopta el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio.

McGuire, R. K. (1974). Seismic structural response risk analysis, incorporating peak response regressions on earthquake magnitude and distance. MIT, Department of Civil Engineering, Research Report R74-51.

McGuire, R. K. (2004). Seismic hazard and risk analysis. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

MinTransporte. (2015). Resolución n.° 108 de 2015, por medio de la cual se adopta la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14. Bogotá: Ministerio de Transporte.

Monelli, D., Pagani, M., Weatherill, G., Danciu, L. y García, J. (2014). Modeling distributed seismicity for probabilistic seismic-hazard analysis: Implementation and insights with the Openquake Engine. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104 (4), 1636-1649. http://dx.doi.org/10.1785/0120130309.

Monsalve, M. L., Correa Tamayo, A. M., Arcila, M. y Dixon, J. (2009). Firma adakítika en los productos recientes de los volcanes Nevado del Huila y Puracé, Colombia. *Boletín Geológico*, 43, 23-39. https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.43.2015.27.

Montalva, G. A., Bastías, N. y Rodríguez Marek, A. (2017). Ground motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seis-*

*mological Society of America*, 107 (2), 901-911. http://dx.doi.org/10.1785/0120160221.

Montes, N. E. y Sandoval, A. (2001). Base de datos de fallas activas de Colombia. Proyecto compilación y levantamiento de la información geodinámica (Proyecto RG502), Glosario: 9-26.

Musson, R. M. W. (1999). Probabilistic seismic hazard maps for the North Balkan Region. *Annali di Geofisica*, 42 (6), 1109-1124. https://doi.org/10.4401/ag-3772.

NCEDC. (2013). Northern California Earthquake Data Center. Disponible en http://quake.geo.berkeley.edu/anss/anss-detail.html#doc

Ojeda, A. y Martínez, S. A. (1997). *Modelo para la atenuación de la energía sísmica en Colombia a partir de los sismos registrados por la Red Nacional de Acelerógrafos.* XII Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia.

Ordaz, M. (2009). Segundo informe sobre los modelos Ingeominas y AIS de amenaza sísmica de Colombia. Presentación.

Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M. y Vigano, D. (2014a). OpenQuake Engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model. *Seismological Research Letters*, 85 (3), 692-702. http://dx.doi.org/10.1785/0220130087.

Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G. A. y García, J. (2014b). *The OpenQuake-Engine Book: Hazard global earthquake model (GEM) technical report 2014-2018*, http://dx.doi.org/10.13117/GEM.OPENQUAKE.TR2014.08.

Pagani, M., García, J., Monelli, D., Weatherill, G. y Smolka, A. (2015). A summary of hazard datasets and guidelines supported by the global earthquake model during the first implementation phase. *Annals of Geophysics*, 58 (1) S0108. http://dx.doi.org/10.4401/ag-6677.

Pagani, M., García, J., Poggi, V. y Weatherill, G. (2016). Probabilistic seismic hazard analysis: Issues and challenges from the gem perspective. Ponencia presentada en el 5th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion. Taipei, China.

Paris, G., Machette, M., Dart, R. y Haller, K. (2000). Map and database of quaternary faults and folds in Colombia and its offshore regions. United States. *Geological Survey Open-File Report*, 00-(284), 66.

Pasyanos, M. E., Masters, T. G., Laske, G. y Ma, Z. (2014). LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119 (3), 2153-2173. http://dx.doi.org/10.1002/2013jb010626.

PEER. (2013). GEM-PEER Task 3 Project: Selection of a global set of ground motion prediction equations.

Pedraza García, P., Vargas, C. A. y Monsalve, H. (2007). Geometric model of the Nazca plate subduction in Southwest Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 11 (2), 117-130.

Pennington, W. D. (1983). Role of shallow phase changes in the subduction of oceanic crust. *Science*, 220 (4601), 1045-1047. http://dx.doi.org/10.1126/ science.220.4601.1045

Petersen, M., Harmsen, S., Haller, K., Mueller, C., Luco, N., Hayes, G. y Rukstales, K. (2010). Preliminary seismic hazard model for South America. *In Proceedings of Conferencia Internacional. Homenaje a Alberto Giesecke Matto*.

Poveda, E., Julia, J., Schimmel, M. y Pérez García, N. (2018). Upper and middle crustal velocity structure of the Colombian Andes from ambient noise tomography: Investigating subduction-related magmatism in the overriding plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123 (2), 1459-1485. http://dx.doi.org/10.1002/2017JB014688.

Prieto, G. A., Beroza, G. C., Barrett, S. A., López, G. A. y Flórez, M. (2012). Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics. *Tectonophysics*, 570-571, 42-56. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.019.

Proyecto Multinacional Andino. (2008). Geociencia para las comunidades andinas atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Servicio Nacional de Geología y Minería, *Publicación Geológica Multinacional*, 7. 1 mapa en CD-ROM.

Ramírez, J. E. y Forero Durán, L. F. (1957). Mapa sísmico y tectónico de Colombia. Instituto Geofísico de los Andes Colombianos.

Reasenberg, P. (1985). Second-order moment of central California seismicity, 1969-1982, *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 90 (B7), 5479-5495.

Reiter, L. (1991). *Earthquake hazard analysis.* New York: Columbia University Press.

Salgado, M. A., Bernal, G. A. Yamín, L. E. y Cardona, O. D. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia: actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Revista de Ingeniería*, 32, 28-37.

Salgado Gálvez, M. A., Bernal, G. A. y Cardona, O. D. (2016). Evaluación probabilista de la amenaza sísmica de Colombia con fines de actualización de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 32 (4), 230-239. https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.07.001.

Sarria, A. (1995). *Ingeniería sísmica.* (2.ª ed.). Bogotá: Ediciones Uniandes.

Scherbaum, F., Cotton, F. y Smit, P. (2004). On the use of response spectral-reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic-hazard analysis in regions of moderate seismicity: The Case of rock motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94 (6), 2164-2185. http://dx.doi.org/10.1785/0120030147.

Scherbaum, F., Delavaud, E. y Riggelsen, C. (2009). Model selection in seismic hazard analysis: an information-theoretic perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99 (6), 3234-3247. http://dx.doi.org/10.1785/0120080347.

Schneider, J. F., Pennington, W. D. y Meyer, R. P. (1987). Microseismicity and focal mechanisms of the intermediate-depth Bucaramanga Nest, Colombia. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 92 (B13), 13913-13926. https://doi.org/10.1029/JB092iB13p13913.

Scordillis, E. (2006). Empirical global relations converting Ms and mb to moment magnitude. *Journal of Seismology*, 10, 225-236. https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4.

Sepúlveda Jaimes, F.J. y Cabrera Zambrano, F. H. (2018). Tomografía sísmica 3D del nido sísmico de Bucaramanga (Colombia). *Boletín de Geología*, 40 (2), 15-33. http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v40n2-2018001.

SGC. (2015). *Mapa de intensidades máximas observadas para Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

SGC. (2018). Consulta de la amenaza sísmica de Colombia. Disponible en https://amenazasismica.sgc.gov.co/

SGC. (s/f). Sismicidad histórica de Colombia. Consultado en http://sish.sgc.gov.co/visor/

SGC. (s/f). Consulta Catálogo Sísmico. Disponible en https://www2.sgc.gov.co/sgc/sismos/Paginas/catalogo-sismico.aspx

Singh, S. K., Reinoso, E., Arroyo, D., Ordaz, M., Cruz Atienza, V., Pérez Campos, X., Iglesias, A. y Hjörleifsdóttir, V. (2018). Deadly intraslab Mexico earthquake of 19 September 2017 (Mw 7.1): Ground motion and damage pattern in Mexico City. *Seismological Research Letters,* 89 (6), 2193-2203. https://doi.org/10.1785/0220180159.

Stafford, P. J., Strasser, F. O. y Bommer, J. J. (2008). An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 149-177. http://dx.doi.org/10.1007/s10518-007-9053-2.

Stepp, J. (1972). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. *Proceedings of the International Conference on Microzonation*, 2, 897-910.

Storchak, D., Di Giacomo, I., Bondár, I., Engdahl, R., Harris, J., Lee, W. y Bormann, P. (2013). Public release of the ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue (1900-2009). *Seismological Research Letters*, 84 (5), 810-815. https://doi.org/10.1785/0220130034.

Strasser, F., Arango, M. y Bommer, J. (2010). Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude. *Seismological Research Letters*, 81 (6), 941-950. http://dx.doi.org/10.1785/gssrl.81.6.941.

Taboada, A., Dimaté, C. y Fuenzalida, A. (1998). Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. *Física de la Tierra*, 10, 111-147.

Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H. y Olaya, J. (2000). Geodynamics of Northern Andes: Subduction and intra-continental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19 (5), 787-813. https://doi.org/10.1029/2000TC900004.

Thingbaijam, K. K. S. y Mai, P. (2016). Evidence for truncated exponential probability distribution of earthquake slip. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (4), 1802-1816. http://dx.doi.org/10.1785/0120150291.

Thompson, E. M. y Wald, D. J. (2012, septiembre). *Developing Vs30 site-condition maps combining observations with geologic and topographic constraints.* Ponencia presentada en el 15 World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Lisboa, Portugal.

Thompson, E. M., Wald, D. J. y Worden, C. B. (2014). A Vs30 map for California with geologic and topographic constrains. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104 (5), 2313-2321. http://dx.doi.org/10.1785/0120130312.

Trifonov, V. G. y Machette, N. M. (1993). The world map of major active faults project. *Annali di Geofísica*, 36 (3-4), 225-236.

Uhrhammer, R. (1986). Characteristics of Northern and Central California seismicity, *Earthquake Notes*, 57 (1), 21.

USGS. (s/fa). Centennial Earthquake Catalog. Disponible en https://earthquake.usgs.gov/data/centennial/

USGS. (s/fb). Search Earthquake Catalog. Disponible en https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/

USGS. (2014). USGS, About ANSS comprehensive catalog and important caveats. Disponible en http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/doc_aboutdata.php#reference

Van der Meijde, M., Julià, J. y Assumpção, M. (2013). Gravity derived Moho for South America. *Tectonophysics*, 609, 456-467. http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.023.

Van der Hilst, R. y Mann, P. (1994). Tectonic implication of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. *Geology*, 22 (5), 451-454. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0451:TIOTIO>2.3.CO;2.

Van Stiphout, T., Zhuang, J. y Marsan, D. (2012). Theme V-Models and techniques for analysing seismicity. Technical report. Community online resource for statistical seismicity analysis. Disponible en http://www.corssa.org

Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H. y Kanamori, H. (1999). Relationships between peak ground acceleration, Peak ground velocity and modified mercalli intensity in California. *Earthquake Spectra*, 15 (3), 557-564. https://doi.org/10.1193/1.1586058.

Wald, D. J. y Allen, T. I. (2009). On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (VS30). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99 (2A), 935-943. http://dx.doi.org/10.1785/0120080255.

Wald, D. J., McWhirter, L., Thompson, E. y Hering, A. S. (2011). A new strategy for developing Vs30 maps. *4 IASPEI-IAEE International Symposium*.

Weatherall, P., Marks, K. M., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., Arndt, J. E., Rovere, M., Chayes, D., Ferrini, V. y Wigley, R. (2015). A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and Space Science*, 2 (8), 331-345. http://dx.doi.org/10.1002/2015EA000107.

Weatherill, G. (2014). *OpenQuake hazard modeller's toolkit: User guide*. Technical Report, GEM Foundation.

Weichert, D. H. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70 (4), 1337-1346.

Woessner, J. y Wiemer, S. (2005). Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95 (2), 684-698. https://doi.org/10.1785/0120040007.

Woo, G. (1996). Kernel estimation methods for seismic hazard area source modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (2), 353-362.

Youngs, R. R. y Abrahamson, N. A. (1992). A stable algorithm for regression analyses using the random effects model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82 (1), 505-510.

Youngs, R., Chiou, S., Silva, W. y Humphrey, J. (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68 (1), 58-73. http://dx.doi.org/10.1785/gssrl.68.1.58.

Youngs, R. R. y Coppersmith, K. J. (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75 (4), 939-964.

Zarifi, Z., Havskov, J. y Hanyga, A. (2007). An insight into the Bucaramanga nest. *Tectonophysics*, 443 (1-2), 93-105. http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2007.06.004.

Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Toshimasa, T. y Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (3), 898-913. http://dx.doi.org/10.1785/0120050122.

Zhao, J. X., Zhou, S. L., Gao, P. J., Long, T., Zhang, Y. B., Thio, H. K., Lu, M. y Rhoades, D. A. (2015). An earthquake classification scheme adapted for Japan determined by the goodness-of-fit for ground-motion prediction equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105 (5), 2750-2763. https://doi.org/10.1785/0120150013.

Zhao, J. X., Zhou, S., Zhou, J., Zhao, C., Zhang, H., Zhang, Y. e Irikura, K. (2016a). Ground-motion prediction equations for shallow crustal and uppe rmantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (4), 1552-1569. http://dx.doi.org/10.1785/0120150063.

Zhao, J. X., Liang, X., Jiang, F., Xing, H., Zhu, M., Hou, E. y Somerville, P. G. (2016b). Ground-motion prediction equations for subduction interface earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (4), 1518-1534. http://dx.doi.org/10.1785/0120150034.

Zhao, J., Jiang, F., Shi, P., Xing, H., Huang, H. y Hou, R. (2016c). Ground-motion prediction equations for subduction slab earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (4), 1535-1551. http://dx.doi.org/10.1785/0120150056.

Zhuang, J., Ogata, Y. y Vere Jones, D. (2002). Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences. *Journal of the American Statistical Association*, 97 (458), 369-380. https://doi.org/10.1198/016214502760046925.

| ANEXOS | |
|---|---|
| A | **Catálogos sísmicos utilizados**<br>En este anexo se presenta una descripción general de los catálogos utilizados para la creación del Catálogo Sísmico Integrado**.** |
| B | **Base de datos de movimiento fuerte**<br>n este anexo se presentan las principales características de los eventos sísmicos que componen la base de datos de movimiento fuerte, en términos de su localización, profundidad, mecanismo focal y tipo de falla. |
| C | **Metodología adoptada para la corrección de línea base y filtrado de acelerogramas**<br>En este anexo se describe la metodología aplicada para procesar los registros acelerográficos de la base de datos de movimiento fuerte. Esta metodología se fundamenta en la propuesta por Ancheta *et al.* (2013), y corresponde a un proceso iterativo en que el registro se somete a una corrección de línea base y a un proceso de filtrado en el dominio de la frecuencia. |
| D | **Distribuciones de magnitud-frecuencia en fuentes corticales tipo área**<br>En este anexo se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia obtenidas en las fuentes corticales tipo área |
| E | **Distribuciones de magnitud-frecuencia en macrozonas del modelo de sismicidad suavizado**<br>En este anexo se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia obtenida en las macrozonas establecidas en el modelo de sismicidad distribuida. |
| F | **Distribuciones de magnitud-frecuencia en fallas activas**<br>En este anexo se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia obtenidas en las fallas activas. |
| G | **Distribuciones de magnitud-frecuencia en fuentes interplaca (subducción), Benioff y nido sísmico de Bucaramanga**<br>En este anexo se presentan las distribuciones de magnitud-frecuencia obtenidas en las fuentes interplaca, de la zona Benioff y del nido sísmico de Bucaramanga. |
| H | **Metodologías utilizadas en la selección ecuaciones de atenuación**<br>En este anexo se presenta una descripción de las siguientes metodologías empleadas para la selección de ecuaciones de atenuación:<br>• Análisis de residuales (Stafford *et al.*, 2008)<br>• Modelo de verosimilitud (LH) (Scherbaum *et al.,* 2004)<br>• Modelo del logaritmo de verosimilitud normalizado (LLH) (Scherbaum *et al.*, 2009)<br>• Ranking basado en la distancia euclidiana (Kale y Akkar, 2013) |
| I | **Propiedades geométricas utilizadas en ecuaciones de atenuación**<br>En este anexo se presentan las propiedades geométricas requeridas para el cálculo de intensidades sísmicas usando las ecuaciones de atenuación consideradas en este estudio.<br>Estas propiedades se presentan según ambientes tectónicos en cada uno de los registros de la base de datos de movimiento fuerte. Estas propiedades están definidas para localizar cada estación con respecto a cada evento registrado. Asimismo, en este anexo se presentan los valores de PGA obtenidos en cada registro procesado. |
| J | **Resultados de la selección de ecuaciones de atenuación según ambiente tectónico**<br>En este anexo se presentan los valores del parámetro LLH obtenido en las ecuaciones de atenuación preseleccionadas. Este parámetro permite evaluar el ajuste de tales ecuaciones con las aceleraciones de los eventos de la base de base de datos de movimiento fuerte.<br>También se presentan, para las ecuaciones de mejor ajuste, los resultados obtenidos de otros parámetros de evaluación y diferentes periodos de vibración. |
| K | **Resultados de amenaza sísmica para las capitales departamentales**<br>En este anexo se presentan los espectros de amenaza uniforme correspondientes a las capitales departamentales, obtenidos en diferentes periodos de retorno y percentiles. También se exponen valores medios de las curvas de amenaza correspondientes a diferentes periodos de vibración. |
| L | **Descripción del sistema de consulta del modelo y de los resultados de la amenaza sísmica**<br>En este anexo se presenta una descripción breve del sistema de consulta, indicando su estructura principal y los resultados puestos a disposición del público. |

# Anexos

# A

# Descripción de catálogos sísmicos utilizados

En este anexo se presentan descripciones generales de los catálogos globales y nacionales empleados para la construcción del Catálogo Sísmico Integrado.

### EHB. Engdahl, Van der Hilst and Buland catalogue

Es una versión ajustada del Boletín del Centro Internacional de Sismología (ISC) y contiene datos de 1960 a 2008. En el catálogo EHB se utilizó el algoritmo de Engdahl *et al.* (1998) para mejorar las localizaciones hipocentrales de sismos anteriores al año 2009 y registrados en los siguientes catálogos: *International Seismological Summary* (ISS), ISC y *Preliminary Determination of Epicenters* (PDE). La mayoría de las magnitudes tipo Ms y mb son tomadas del ISC. En el presente estudio se usaron eventos de magnitudes mayores de 3,0. Los eventos sísmicos del catálogo EHB se obtuvieron en el sitio de consulta del ISC (ISC, 2012).

### ISC-GEM

Este catálogoes el resultado del trabajo conjunto del Centro Internacional de Sismología (ISC) y la Fundación Global Earthquake Model (GEM). En él se realizaron mejoras y refinamientos de la distribución de la sismicidad y de magnitudes. Este catálogo también integra información de magnitudes de otras agencias, como el Global Centroid Moment Tensor Catalog (GCMT) (Di Giacomo *et al.*, 2014; Storchak *et al.*, 2013). Para la construcción del catálogo ISC-GEM se usaron procesos estandarizados de relocalización homogénea de eventos ocurridos entre 1900 y 2009. También se recalcularon magnitudes tipo Ms y mb, y mediante relaciones de conversión se calcularon magnitudes Mw. Los eventos del catálogo ISC-GEM se obtuvieron en el sitio de consulta del ISC (ISC, s/f a).

### ISC-REV. Boletín sísmico revisado del Centro Internacional de Sismología

El boletín del ISC contiene información de sismos ocurridos a partir de 1900 hasta la fecha. El *Boletín* revisado del ISC cuenta con revisiones manuales en casos en los que se cuenta con información suficiente. Tal revisión se ejecuta en eventos de magnitud ≥ 2,5 que cumplan con los siguientes criterios: que el hipocentro o los datos de arribo sean reportados por más de una agencia; que la configuración de alguna estación no sea aceptable, o bien, que un conjunto de estaciones mejoren la caracterización del evento, comparada con la información que puede suministrar una sola agencia. A la vez, todos los eventos con magnitudes mayores a 3,5 son revisados (ISC s/f b). Los sismos se localizan usando un algoritmo descrito en Bondár y Storchak (2011). Los eventos de este catálogo se obtuvieron en el sitio de consulta del ISC (ISC, s/f c).

### CENT. Centennial

Contiene información de varios catálogos de sismos registrados instrumentalmente desde 1900 hasta 2008. De cada evento se cuenta con una única magnitud homologada y corregida. Este catálogo realiza una relocalización de evento según el algoritmo de Engdahl *et al.* (1998), en los casos en los que existe información suficiente. Este catálogo tomó como partida el generado por Engdahl y Villaseñor (2002) y realiza actualizaciones periódicas. Los eventos del catálogo Centennial se obtuvieron en el sitio de

consulta del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (USGS, s/f a).

### NEIC (ANSS-NEIC). Centro Nacional de Información sobre Sismos del Servicio Geológico de Estados Unidos

Este catálogo contiene información de parámetros de fuente sísmica y otro tipo de información aportada por diferentes redes sísmicas. Está compuesto por datos del Advanced National Seismic System (ANSS) hasta 1972 y del NEIC a partir de 1973. Actualmente, en este catálogo está integrada información de catálogos tales como GCMT, además de información proveniente del PDE (*Preliminary Determination of Epicenters Bulletin*) (USGC, 2014). Los eventos de este catálogo se obtuvieron en el sitio de consulta del USGS (USGS, s/f b).

### GCMT. Global Centroid Moment Tensor Catalogue

El catálogo del GCMT contiene el cálculo de tensores de momento sísmico correspondientes a sismos, en su mayoría, de magnitudes mayores de 5,5 (Storchak *et al.*, 2013). Este catálogo abarca eventos ocurridos a partir de 1976, de los cuales se cuenta con información de sus mecanismos focales. El catálogo del GCMT se encuentra en formato ASCII (conocido como formato *ndk*) y reporta magnitudes Ms y mb. Es posible obtener la magnitud Mw a partir de la información del momento sísmico incluido en dicho formato. Los eventos de este catálogo se obtuvieron en el sitio de consulta del GCMT (GCMT, 2017).

### IDC. Centro Internacional de Datos

El Centro Internacional de Datos (IDC) hace parte del Tratado de Prohibición de Ensayos Nucleares (CTBTO) y está diseñado para recolectar, procesar, analizar y reportar datos recibidos del Sistema Internacional de Monitoreo (IMS). El umbral de magnitud para la detección de sismicidad del IDC es de a 4,0 (mb). Los eventos sísmicos no relacionados con pruebas nucleares son reportados al ISC (ISC, 2015).

Los eventos de este catálogo se obtuvieron en el sitio de consulta del *Boletín* del ISC (ISC s/f c). En la búsqueda de estos eventos, en la sección de parámetros opcionales de consulta se seleccionó la opción "IDC" en el campo de autor de la magnitud.

### GUTE. Catálogo Gutenberg-Richter

De acuerdo con Engdahl y Villaseñor (2002), entre las bases de datos más relevantes para la descripción de sismos ocurridos antes de 1950 se encuentra el catálogo elaborado por Gutenberg y Richter (1954), que contiene hipocentros y magnitudes de sismos importantes ocurridos entre 1904 y 1952.

Los eventos de este catálogo se obtuvieron en el sitio de consulta del *Boletín* del ISC (ISC s/f c). En la búsqueda de estos eventos, en la sección de parámetros opcionales de consulta se seleccionó la opción "GUTE" en el campo de autor de la magnitud.

### PAS. California Institute of Technology

Este catálogo hace parte del catálogo integrado del sur de California (Hutton, Woessner y Hauksson, 2010), y es registrado por el Instituto de Tecnología de California (Caltech). Este catálogo comenzó con siete estaciones en 1932, con sismómetros de tipo Wood-Anderson o Benioff, y para determinar las localizaciones generalmente priorizaba el registro obtenido en la estación de Pasadena (PAS). Desde los años setenta, Caltech comenzó una colaboración con el USGS para constituir la Red Sismológica del Sur de California (SCSN). Los eventos de este catálogo se obtuvieron en el sitio de consulta del ISC (ISC, s/f c).

### SGC. Servicio Geológico Colombiano

La Red Sismológica del SGC inició operaciones en junio de 1993 calculando inicialmente magnitud local (ML), y a partir de 2010 se inició el cálculo de magnitudes de momento (Mw). Para este catálogo se definió una zona de confiabilidad dentro de la cual las soluciones se consideran de mayor calidad. Las soluciones obtenidas fuera de dicha zona se consideran de alta incertidumbre, razón por la cual se usan únicamente en caso de que no existan reportes de mejor calidad en otras agencias globales o nacionales.

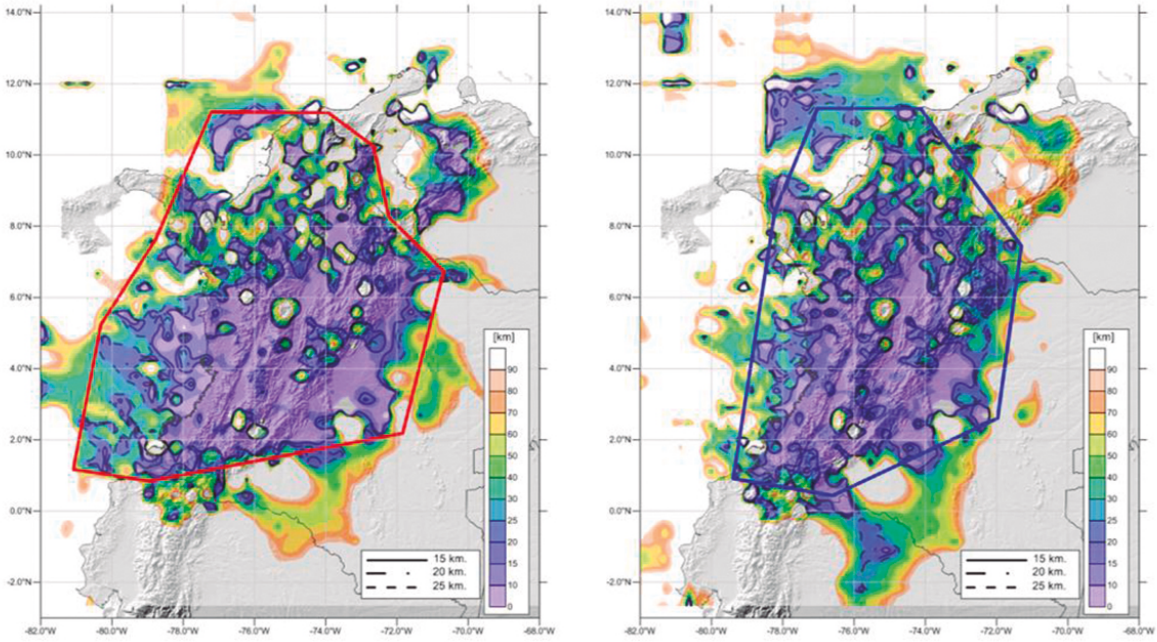



**Figura A. 1** Errores en latitud y longitud de los eventos reportados en el Catálogo del SGC. Las líneas roja y azul corresponden a 15 km
**Fuente:** Los autores

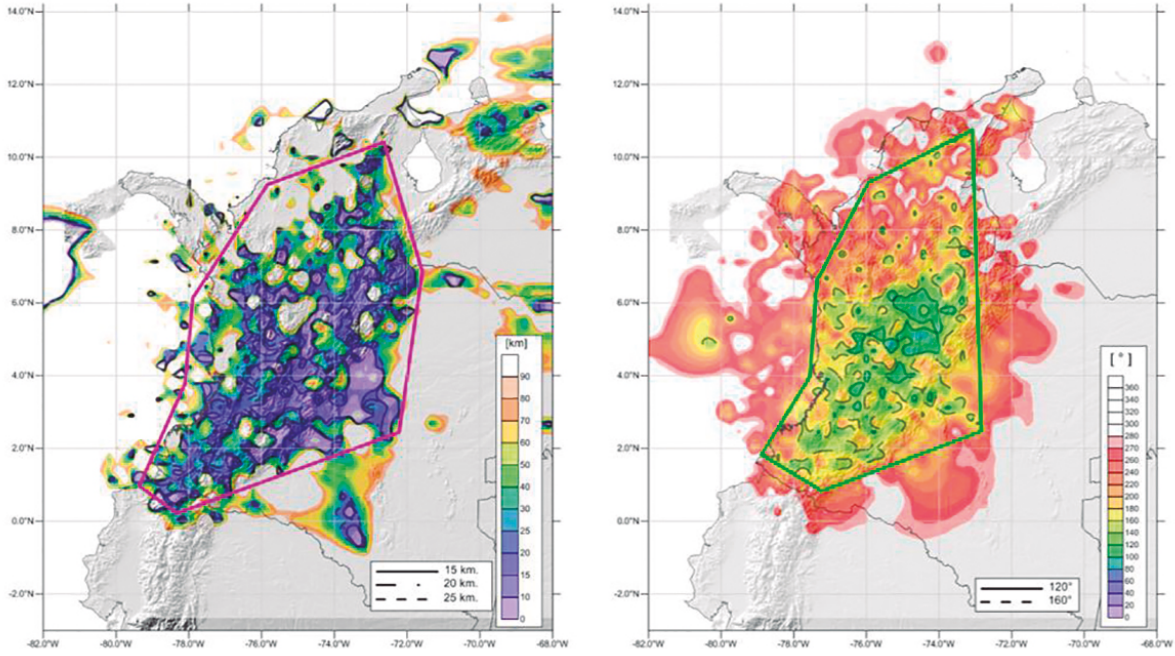



**Figura A. 2** Errores en profundidad (izquierda) y GAP (derecha) de los eventos reportados en el Catálogo del SGC. La línea morada corresponde a un error de 15 km, y la verde, a un GAP de 160°
**Fuente:** Los autores

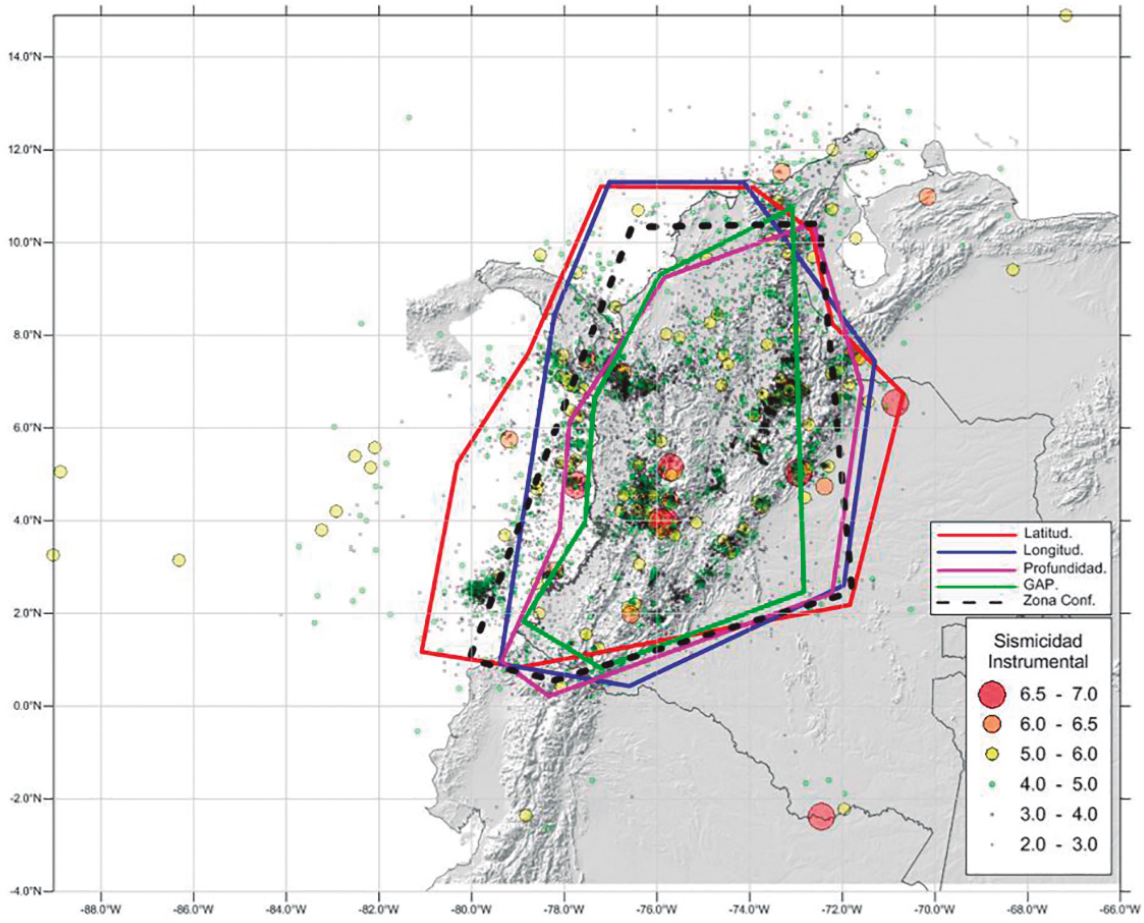



**Figura A. 3** Zona de confiabilidad del Catálogo del SGC correspondiente al promedio de los límites de los errores en latitud, longitud, profundidad y GAP
**Fuente:** Los autores

La zona de confiabilidad se determinó utilizando el promedio de las envolventes de los valores máximos aceptables de los parámetros de error en la localización en latitud, longitud y profundidad, además de los límites de los ángulos de mayores aberturas azimutales entre estaciones (GAP). Estos límites se establecieron en 15 km para el error en la localización (latitud, longitud y profundidad, Figura A. 1) y en 160° para el GAP (Figura A. 2). Asimismo, para la definición final del polígono de la zona de confiabilidad se tuvo en cuenta la sismicidad instrumental registrada por el SGC.

Los eventos localizados en el área de confiabilidad se incluyeron en el Catálogo SGCi, y aquellos situados fuera de dicha área, en el Catálogo "SGCo. La Figura A. 3 presenta los límites de las zonas de confiabilidad establecidas.

Por otro lado, el SGC estudia la sismicidad histórica ocurrida en la región a partir de información macrosísmica. Estos estudios, además de algunos datos tomados del estudio de sismicidad histórica de la fundación GEM (Albini *et al.*, 2013), aportan información sísmica al catálogo integrado desde 1610 hasta 1953 (SGC-H), y se reportan magnitudes Mw de 42 sismos.

El catálogo de eventos registrados por la Red Sismológica del Servicio Geológico Colombiano se en-

cuentra disponible al público y puede ser consultado en el portal web institucional, en la sección denominada "Aplicaciones sismos" (SGC, s/f b).

### IGEPN. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador

Este catálogo corresponde a una integración de información generada por diferentes agencias del mundo, siguiendo un orden de priorización para definir la localización y la magnitud de los sismos (Beauval *et al.*, 2013). El Catálogo IGEPN contiene eventos ocurridos a partir de 1995, con magnitudes mayores e iguales a 2,7Md.

Este catálogo puede obtenerse realizando una consulta en la página del IGEPN, en la sección denominada "Descarga de datos" (IGEPN, s/f). En el presente estudio se utilizó el conjunto de datos correspondiente al "Catálogo sísmico homogeneizado hasta el 2009".

### CASC. Centro Sismológico de América Central

El Centro Sismológico de América Central (CASC por sus siglas en inglés) comenzó a operar en 1992. Hacen parte de este centro los siguientes países e instituciones: Guatemala (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Insivumeh), El Salvador (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, SNET), Honduras (Universidad Nacional Autónoma de Honduras, UNAH), Nicaragua (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Ineter), Costa Rica (Red Sismológica Nacional, RSN; Instituto Costarricense de Electricidad, ICE; Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Ovsicori) y Panamá (Universidad de Panamá, UPA). Cada institución aporta información de eventos sísmicos que son compilados y reportados al ISC. La base de datos del catálogo del CASC consta de 28.159 eventos con magnitudes mb y Mw (Alvarenga *et al.*, 1998), de los cuales 751 se encuentran en el área de estudio.

# B

# Base de datos de movimiento fuerte

En este anexo se presentan las principales características de los eventos sísmicos que componen la base de datos de movimiento fuerte. La Tabla B.1 presenta una descripción de los parámetros utilizados para caracterizar los eventos.

La Tabla B. 2 presenta los eventos pertenecientes a fuentes corticales (superficiales). La Tabla B. 3 presenta los eventos correspondientes al nido sísmico de Bucaramanga. La Tabla B. 4 presenta los eventos de la zona Benioff y la Tabla B. 5 presenta los eventos interplaca de la subducción del pacífico.

**Tabla B.1** Resumen de parámetros para el resumen de eventos sísmicos

| *Campo* | *Definición* |
|---|---|
| ID | ID asignado a cada evento, corresponde a un código que comienza por "EC_" para los sismos de Ecuador de 2016 y por "CO_" para los demás eventos. Luego de este código sigue un valor numérico que representa la fecha del sismo desde el año hasta minutos o segundos, de la siguiente manera: AAAAMMDDHHMMSS. |
| Prof, [km] | Profundidad del evento en kilómetros, tomada del GCMT. |
| Mw | Magnitud de Momento del sismo, calculada apartir del momento escalar determinado por el GCMT. |
| Lat, [°] | Longitud del evento en grados, tomada del GCMT. |
| Lon, [°] | Latitud del evento, tomada del GCMT. |
| Str1, [°] | Strike del primer plano nodal, tomado del GCMT. |
| Dip1, [°] | Dip del primer plano nodal, tomado del GCMT. |
| Rake1, [°] | Rake del primer plano nodal, tomado del GCMT. |
| Str2, [°] | Strike del segundo plano nodal, tomado del GCMT. |
| Dip2, [°] | Dip del segundo plano nodal, tomado del GCMT. |
| Rake2, [°] | Rake del segundo plano nodal, tomado del GCMT. |
| Plano | Plano de solución preferida. |
| M. F. | Mecanismo focal simplificado según la metodología de Kaverina de 1996. |

**Tabla B.** 2 Eventos corticales

| *ID* | *Prof, [km]* | *Mw* | *Lat, [°]* | *Lon, [°]* | *Str1, [°]* | *Dip1, [°]* | *Rake1, [°]* | *Str2, [°]* | *Dip2, [°]* | *Rake2, [°]* | *Plano* | *M. F.* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19940606204742 | 12 | 6.8 | 2.91 | -75.98 | 206 | 76 | 170 | 299 | 80 | 14 | 1 | S |
| CO_19940913100134 | 14 | 6.0 | 7.11 | -76.67 | 4 | 64 | 9 | 270 | 82 | 153 | 1 | S |
| CO_19950119150505 | 17 | 6.5 | 5.05 | -72.94 | 38 | 33 | 95 | 212 | 57 | 87 | 1 | R |
| CO_19950120135924 | 54.1 | 5.2 | 5.17 | -72.94 | 170 | 24 | 50 | 33 | 72 | 106 | 1 | R |
| CO_19950122104129 | 21.7 | 5.6 | 5.11 | -72.95 | 243 | 36 | 136 | 10 | 66 | 62 | 1 | S |
| CO_19950423235543 | 43.2 | 5.2 | 5.18 | -72.49 | 68 | 52 | 133 | 191 | 55 | 48 | 1 | R |
| CO_19951003015125 | 24 | 7.0 | -2.79 | -77.82 | 234 | 39 | 120 | 18 | 57 | 68 | 1 | R |
| CO_19961104172500 | 14 | 6.3 | 7.36 | -77.38 | 188 | 43 | 42 | 64 | 63 | 124 | 1 | S |
| CO_19980623013633 | 28.1 | 5.7 | 10.57 | -76.35 | 267 | 82 | 0 | 357 | 90 | -172 | 2 | S |
| CO_19990125181918 | 17 | 6.1 | 4.45 | -75.66 | 8 | 65 | -21 | 107 | 71 | -153 | 2 | S |
| CO_20000117122008 | 43.3 | 5.6 | 6.72 | -72.00 | 154 | 26 | 71 | 355 | 65 | 99 | 1 | R |
| CO_20000523163648 | 40.9 | 5.2 | 2.15 | -78.35 | 327 | 27 | 27 | 213 | 78 | 115 | 1 | S |
| CO_20001008201230 | 10 | 5.1 | 0.36 | -78.10 | 342 | 42 | 90 | 162 | 48 | 90 | 1 | R |
| CO_20010908224510 | 24.6 | 5.1 | 8.35 | -74.83 | 310 | 75 | 2 | 220 | 88 | 165 | 1 | S |
| CO_20020426013626 | 24.9 | 5.1 | 6.59 | -73.58 | 207 | 38 | 136 | 334 | 65 | 61 | 1 | S |

(.../...)

| ID | Prof, [km] | Mw | Lat, [°] | Lon, [°] | Str1, [°] | Dip1, [°] | Rake1, [°] | Str2, [°] | Dip2, [°] | Rake2, [°] | Plano | M. F. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20040220111558 | 39.7 | 4.8 | 10.75 | -73.85 | 120 | 51 | 133 | 244 | 56 | 50 | 1 | R |
| CO_20040818070652 | 22.9 | 5.1 | 2.22 | -76.62 | 69 | 79 | 8 | 338 | 82 | 169 | 1 | S |
| CO_20070306130508 | 15 | 5.2 | 2.09 | -76.54 | 102 | 47 | 1 | 11 | 89 | 137 | 1 | S |
| CO_20070424085334 | 50.6 | 5.1 | 5.62 | -75.90 | 154 | 23 | -132 | 18 | 73 | -75 | 2 | N |
| CO_20070620190407 | 24.3 | 5.2 | 7.12 | -72.22 | 237 | 42 | 155 | 346 | 74 | 51 | 1 | S |
| CO_20070716225823 | 30.6 | 5.2 | 7.16 | -72.18 | 227 | 29 | 108 | 26 | 62 | 80 | 1 | R |
| CO_20080524192044 | 14.7 | 5.9 | 4.37 | -73.71 | 196 | 82 | -179 | 106 | 89 | -8 | 2 | S |
| CO_20090912200625 | 10 | 6.4 | 10.73 | -67.97 | 184 | 73 | 8 | 91 | 83 | 163 | 1 | S |
| CO_20100326015638 | 15 | 5.0 | -1.29 | -78.34 | 215 | 74 | -180 | 125 | 90 | -16 | 2 | S |
| CO_20100605011959 | 18.1 | 4.8 | 5.02 | -72.43 | 227 | 41 | 97 | 38 | 49 | 84 | 1 | R |
| CO_20100729193445 | 33.1 | 5.1 | 3.91 | -75.10 | 37 | 54 | 138 | 155 | 57 | 45 | 1 | S |
| CO_20110302185048 | 33.6 | 5.8 | 8.59 | -76.92 | 191 | 36 | 137 | 318 | 66 | 62 | 1 | S |
| CO_20130516162918 | 33.4 | 4.8 | 12.04 | -73.46 | 259 | 26 | -89 | 78 | 64 | -91 | 2 | N |
| CO_20130806025012 | 31.3 | 4.9 | 7.19 | -77.29 | 198 | 59 | 31 | 91 | 64 | 145 | 1 | S |
| CO_20130825233555 | 24.7 | 4.9 | 7.64 | -75.00 | 247 | 65 | -154 | 145 | 67 | -27 | 2 | S |
| CO_20140105033638 | 32.8 | 5.5 | 4.61 | -76.69 | 288 | 27 | -13 | 30 | 84 | -117 | 2 | N |
| CO_20140109125017 | 15.4 | 5.0 | 3.02 | -75.93 | 43 | 82 | 173 | 134 | 83 | 8 | 1 | S |
| CO_20140217094136 | 41.1 | 5.3 | 6.54 | -71.71 | 136 | 35 | 43 | 8 | 67 | 117 | 1 | S |
| CO_20140219111014 | 19.6 | 5.3 | 9.67 | -69.75 | 240 | 63 | 153 | 343 | 66 | 29 | 1 | S |
| CO_20140221114325 | 25.6 | 5.1 | 12.50 | -70.72 | 273 | 32 | -92 | 95 | 58 | -89 | 2 | N |
| CO_20141020193321 | 3.1 | 5.6 | 0.75 | -77.93 | 52 | 89 | -179 | 322 | 89 | -1 | 2 | S |
| CO_20141128043623 | 51.4 | 5.1 | 8.74 | -77.46 | 168 | 71 | -174 | 76 | 84 | -19 | 2 | S |
| CO_20150205042151 | 5 | 5.3 | 8.24 | -72.14 | 53 | 53 | 138 | 171 | 57 | 45 | 1 | S |
| CO_20150509143151 | 38.7 | 4.9 | 11.48 | -72.12 | 251 | 65 | -7 | 344 | 84 | -155 | 2 | S |
| CO_20150729001025 | 12 | 5.9 | 8.23 | -77.32 | 291 | 65 | 155 | 32 | 67 | 27 | 1 | S |
| CO_20150907055117 | 13.6 | 4.9 | 8.61 | -77.83 | 219 | 47 | 115 | 5 | 49 | 66 | 1 | R |
| CO_20151012043541 | 10 | 4.9 | 7.54 | -77.48 | 345 | 26 | 81 | 175 | 65 | 94 | 1 | R |
| CO_20151128105911 | 15.4 | 4.8 | 3.89 | -71.17 | 301 | 65 | -8 | 34 | 83 | -154 | 2 | S |
| CO_20151229025406 | 5.7 | 5.1 | 6.86 | -76.70 | 4 | 60 | 23 | 262 | 70 | 148 | 1 | S |
| CO_20160411092928 | 22.8 | 5.3 | 7.03 | -76.61 | 13 | 55 | 23 | 270 | 72 | 143 | 1 | S |
| CO_20160914015832 | 18 | 5.9 | 7.37 | -76.17 | 122 | 43 | 165 | 223 | 80 | 48 | 1 | S |
| CO_20161031002012 | 33 | 5.6 | 3.45 | -74.50 | 213 | 51 | 131 | 339 | 54 | 52 | 1 | R |
| CO_20170206130245 | 38 | 5.5 | 3.45 | -74.67 | 217 | 43 | 118 | 1 | 53 | 67 | 1 | R |
| CO_20170418174956 | 14 | 5.9 | -2.71 | -75.30 | 17 | 43 | 90 | 197 | 47 | 90 | 1 | R |

**Tabla B. 3** Eventos del nido sísmico de Bucaramanga

| ID | Prof, [km] | Mw | Lat, [°] | Lon, [°] | Str1, [°] | Dip1, [°] | Rake1, [°] | Str2, [°] | Dip2, [°] | Rake2, [°] | Plano | M. F. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19941210152420 | 161.4 | 5.2 | 6.75 | -72.98 | 45 | 42 | 121 | 186 | 55 | 65 | 1 | R |
| CO_19950520221900 | 146.8 | 5.2 | 5.51 | -73.81 | 282 | 17 | -7 | 20 | 88 | -106 | 2 | N |
| CO_19970101043553 | 160.9 | 5.3 | 6.74 | -72.93 | 126 | 48 | 146 | 240 | 66 | 47 | 1 | S |
| CO_19990318235411 | 65.1 | 5.1 | 10.02 | -73.49 | 182 | 57 | 166 | 280 | 78 | 34 | 1 | S |
| CO_19991108055121 | 161.1 | 5.4 | 6.70 | -72.90 | 54 | 38 | 152 | 167 | 73 | 55 | 1 | S |
| CO_20011119210124 | 161 | 5.3 | 6.73 | -72.90 | 324 | 73 | -9 | 56 | 82 | -162 | 2 | S |
| CO_20040618145954 | 150.8 | 4.8 | 6.64 | -73.06 | 353 | 36 | 143 | 114 | 69 | 60 | 1 | S |
| CO_20041003083030 | 159 | 4.8 | 6.75 | -72.99 | 148 | 64 | -170 | 54 | 81 | -27 | 2 | S |
| CO_20050225064124 | 158.7 | 5.3 | 6.71 | -73.01 | 57 | 54 | -176 | 325 | 87 | -36 | 2 | S |
| CO_20060101094315 | 69.6 | 5.1 | 11.80 | -71.24 | 284 | 37 | -122 | 143 | 59 | -68 | 2 | N |
| CO_20060110031441 | 156.5 | 5.0 | 6.68 | -72.94 | 32 | 43 | 151 | 144 | 70 | 51 | 1 | S |
| CO_20060508150739 | 164.4 | 4.9 | 6.73 | -72.98 | 71 | 66 | 180 | 161 | 90 | 24 | 1 | S |
| CO_20070506044714 | 161.3 | 5.4 | 6.73 | -72.96 | 36 | 49 | 173 | 131 | 85 | 41 | 1 | S |
| CO_20080217211502 | 156 | 5.4 | 6.73 | -72.98 | 10 | 45 | 165 | 111 | 80 | 46 | 1 | S |
| CO_20090420085402 | 123.7 | 5.1 | 7.68 | -73.39 | 300 | 28 | 40 | 173 | 73 | 112 | 1 | S |
| CO_20091027162553 | 159.4 | 5.1 | 6.71 | -72.95 | 42 | 54 | 175 | 135 | 86 | 36 | 1 | S |
| CO_20120224134317 | 164.1 | 5.1 | 6.65 | -73.01 | 226 | 42 | 52 | 93 | 58 | 119 | 1 | R |
| CO_20120901050945 | 163.4 | 5.1 | 6.65 | -72.98 | 48 | 43 | 151 | 159 | 71 | 50 | 1 | S |
| CO_20130725120926 | 157.3 | 5.0 | 6.68 | -73.09 | 72 | 67 | -166 | 337 | 77 | -24 | 2 | S |
| CO_20140207203711 | 158.3 | 5.3 | 6.79 | -73.07 | 13 | 22 | 91 | 191 | 68 | 90 | 1 | R |
| CO_20140314232636 | 131.2 | 5.0 | 10.27 | -72.95 | 182 | 71 | 175 | 274 | 85 | 20 | 1 | S |
| CO_20141125202015 | 158.8 | 5.0 | 6.83 | -73.10 | 146 | 48 | 42 | 25 | 60 | 130 | 1 | S |

(…/…)

| ID | Prof, [km] | Mw | Lat, [°] | Lon, [°] | Str1, [°] | Dip1, [°] | Rake1, [°] | Str2, [°] | Dip2, [°] | Rake2, [°] | Plano | M. F. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20141214014930 | 149.4 | 4.8 | 5.45 | -73.70 | 250 | 9 | -18 | 357 | 87 | -98 | 2 | N |
| CO_20150310205544 | 155 | 6.2 | 6.78 | -72.99 | 142 | 29 | -152 | 26 | 77 | -64 | 2 | N |
| CO_20150322222737 | 154.6 | 4.9 | 6.80 | -73.15 | 66 | 52 | 166 | 164 | 79 | 39 | 1 | S |
| CO_20151014074719 | 125.7 | 5.1 | 7.65 | -73.30 | 333 | 44 | 2 | 242 | 88 | 134 | 1 | S |

**Tabla B. 4** Eventos de la zona de Benioff

| ID | Prof, [km] | Mw | Lat, [°] | Lon, [°] | Str1, [°] | Dip1, [°] | Rake1, [°] | Str2, [°] | Dip2, [°] | Rake2, [°] | Plano | M. F. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19950208184027 | 74 | 6.3 | 4.05 | -76.59 | 210 | 21 | -90 | 30 | 69 | -90 | 2 | N |
| CO_19950819214333 | 120 | 6.5 | 5.11 | -75.59 | 204 | 30 | -99 | 34 | 61 | -85 | 2 | N |
| CO_19960911062847 | 109 | 5.3 | 4.18 | -76.53 | 306 | 51 | 144 | 61 | 63 | 45 | 1 | S |
| CO_19970219182514 | 103.3 | 5.8 | 4.50 | -76.45 | 138 | 42 | 105 | 299 | 50 | 77 | 1 | R |
| CO_19970902121325 | 206 | 6.7 | 3.80 | -75.72 | 256 | 48 | 62 | 115 | 49 | 117 | 1 | R |
| CO_19971211075630 | 178 | 6.3 | 3.91 | -75.77 | 249 | 53 | 31 | 140 | 66 | 139 | 1 | S |
| CO_20010922032339 | 174.2 | 5.9 | 3.85 | -75.91 | 247 | 53 | 31 | 137 | 65 | 139 | 1 | S |
| CO_20050308155943 | 61.3 | 5.0 | 4.41 | -75.95 | 265 | 70 | 12 | 171 | 79 | 159 | 1 | S |
| CO_20050421033924 | 101.9 | 5.2 | 4.99 | -76.26 | 232 | 56 | 1 | 141 | 90 | 146 | 1 | S |
| CO_20080913093201 | 133.1 | 5.7 | 4.80 | -75.52 | 227 | 13 | -115 | 72 | 79 | -85 | 2 | N |
| CO_20090908082601 | 83.8 | 4.8 | 4.63 | -76.63 | 273 | 46 | 115 | 60 | 49 | 66 | 1 | R |
| CO_20091218143003 | 163.5 | 5.1 | 3.05 | -76.27 | 110 | 46 | -172 | 14 | 84 | -44 | 2 | S |
| CO_20100129175223 | 130.7 | 4.9 | 4.66 | -76.01 | 195 | 41 | -72 | 352 | 51 | -105 | 2 | N |
| CO_20100626184014 | 118.6 | 5.2 | -4.83 | -77.27 | 14 | 39 | -66 | 165 | 55 | -108 | 2 | N |
| CO_20100812115416 | 209.9 | 7.1 | -1.27 | -77.32 | 153 | 21 | -68 | 309 | 71 | -98 | 2 | N |
| CO_20101009140447 | 122.8 | 5.2 | -2.74 | -76.71 | 320 | 43 | -103 | 157 | 49 | -78 | 2 | N |
| CO_20110815025319 | 176.8 | 5.7 | -1.79 | -76.99 | 161 | 24 | -48 | 297 | 73 | -106 | 2 | N |
| CO_20120930163135 | 163.9 | 7.2 | 1.92 | -76.40 | 231 | 39 | -113 | 80 | 54 | -73 | 2 | N |
| CO_20130209141608 | 147.2 | 7.0 | 1.13 | -77.41 | 171 | 75 | 167 | 265 | 78 | 15 | 1 | S |
| CO_20130827232205 | 69.4 | 4.8 | 3.75 | -76.68 | 63 | 42 | 136 | 189 | 63 | 57 | 1 | S |
| CO_20150221222646 | 95 | 5.2 | 4.67 | -76.18 | 93 | 51 | -179 | 2 | 89 | -39 | 2 | S |
| CO_20150222125624 | 149 | 5.6 | 2.73 | -76.50 | 119 | 45 | -156 | 12 | 74 | -48 | 2 | N |

**Tabla B. 5** Eventos interplaca de la subducción del pacífico

| ID | Prof, [km] | Mw | Lat, [°] | Lon, [°] | Str1, [°] | Dip1, [°] | Rake1, [°] | Str2, [°] | Dip2, [°] | Rake2, [°] | Plano | M. F. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19980804185920 | 20 | 7.1 | -0.59 | -80.31 | 27 | 15 | 124 | 172 | 78 | 82 | 1 | R |
| CO_20001108070000 | 17 | 6.5 | 7.09 | -77.80 | 321 | 22 | 56 | 177 | 72 | 103 | 1 | R |
| CO_20030822052915 | 31.4 | 5.0 | 3.08 | -77.87 | 253 | 45 | -73 | 50 | 47 | -106 | 2 | N |
| CO_20041115090656 | 15 | 7.2 | 4.71 | -77.47 | 21 | 11 | 114 | 177 | 79 | 85 | 1 | R |
| CO_20060123205046 | 23.4 | 6.2 | 6.86 | -77.78 | 316 | 14 | 53 | 174 | 79 | 98 | 1 | R |
| CO_20060124021544 | 25 | 5.4 | 6.83 | -77.68 | 307 | 29 | 50 | 170 | 68 | 110 | 1 | R |
| CO_20060129174914 | 15.6 | 5.2 | 6.77 | -77.73 | 313 | 23 | 58 | 167 | 71 | 103 | 1 | R |
| CO_20070910014914 | 29.3 | 6.7 | 2.96 | -77.95 | 54 | 23 | -95 | 239 | 67 | -88 | 2 | N |
| CO_20100911185524 | 50.1 | 5.2 | -4.35 | -80.59 | 13 | 26 | 113 | 168 | 66 | 79 | 1 | R |
| CO_20101125041940 | 26.1 | 5.4 | 0.38 | -79.97 | 54 | 23 | 138 | 184 | 75 | 72 | 1 | S |
| CO_20110817080204 | 21 | 5.0 | 5.65 | -77.64 | 343 | 25 | 90 | 164 | 65 | 90 | 1 | R |
| CO_20110913043848 | 15 | 5.2 | 5.67 | -77.59 | 13 | 14 | 100 | 182 | 76 | 88 | 1 | R |
| CO_20110913044935 | 12.8 | 5.5 | 5.65 | -77.56 | 360 | 18 | 89 | 181 | 72 | 90 | 1 | R |
| CO_20120110180712 | 36.8 | 5.1 | -0.88 | -80.42 | 16 | 30 | 99 | 186 | 61 | 85 | 1 | R |
| CO_20140309202955 | 25.9 | 5.6 | 1.52 | -79.56 | 38 | 12 | 126 | 182 | 80 | 83 | 1 | R |
| CO_20140616063932 | 7.3 | 5.7 | 1.65 | -79.38 | 29 | 11 | 116 | 183 | 80 | 85 | 1 | R |
| CO_20150530062605 | 13 | 5.4 | 1.22 | -79.57 | 32 | 21 | 117 | 183 | 72 | 80 | 1 | R |
| CO_20150719111621 | 10 | 5.0 | 2.76 | -78.90 | 17 | 10 | 101 | 186 | 81 | 88 | 1 | R |
| EC_20160416235837 | 21 | 7.8 | 0.35 | -79.93 | 27 | 21 | 124 | 171 | 73 | 78 | 1 | R |
| EC_20160518075703 | 16 | 6.7 | 0.43 | -79.79 | 28 | 18 | 123 | 174 | 75 | 80 | 1 | R |
| EC_20160518164644 | 30 | 6.9 | 0.50 | -79.62 | 28 | 21 | 123 | 174 | 73 | 78 | 1 | R |

C

# Metodología adoptada para la corrección de línea base y filtrado de acelerogramas

En este anexo se describe la metodología utilizada para el procesamiento de registros de la base de datos de movimiento fuerte. Esta metodología se basa en la propuesta de (Ancheta et al., 2013) y consiste en un proceso iterativo en donde el registro se somete a una corrección de línea base y a un proceso de filtrado en el dominio de la frecuencia. Este procedimiento se aplicó luego de la corrección instrumental de las señales.

A continuación se presenta una breve descripción de los pasos que componen la metodología adoptada.

1. Se lee la señal de entrada con corrección instrumental.
2. Se realiza una primera corrección de línea base del registro de aceleraciones que consta en la resta del valor de aceleración promedio calculado a todo el registro.
3. Con el fin de aplicar una transformada rápida de Fourier (*fft* por la sigla en inglés de *Fast Fourier Transform*) y realizar cálculos espectrales de los registros en el dominio de la frecuencia, se agregan ceros al final del registro hasta que el número de datos de este corresponda a una potencia de 2, un requerimiento para poder utilizar correctamente la transformada *fft* debido al número de operaciones por realizar (Cooley, Lewis, & Welch, 1967).
4. Se seleccionan las frecuencias iniciales de filtrado, que en este caso corresponden a 0.01 Hz y a 3/4 de la frecuencia de Nyquist, que corresponde a la mayor frecuencia que puede ser captada dentro de un registro (Douglas & Boore, 2011)
5. Con las frecuencias de filtrado seleccionadas se procede a aplicar un filtro acausal, como el doble filtrado con un filtro causal (Boore D. M.). En este caso se utilizó un filtro Butterworth de orden 4 con el fin de obtener un mayor rango de periodos utilizables para un análisis de desplazamientos espectrales (Akkar & Bommer, 2006).
6. Luego de filtrada la señal se retiran del final del registro filtrado los valores correspondientes a los ceros adicionados en el paso “3”.
7. A partir del registro de aceleraciones filtrado, que se denomina A(t) se calcula el registro de desplazamientos D(t) por medio de una doble integración numérica.
8. Al registro de desplazamientos D(t) se ajusta un polinomio de grado 6, con los coeficientes para los órdenes 0 y 1 iguales a 0. Este polinomio se denomina D2(t).
9. El polinomio D2(t) es derivados dos veces con respecto al tiempo para obtener un registro de aceleración denominado A2(t). Paso seguido se calcula un vector de aceleración resultante como

Af(t) = A(t) – A2(t), con el fin de realizar una segunda corrección de línea base a partir del registro de desplazamientos.

10. Se verifica si el vector de desplazamientos es aceptable. En este caso, esta verificación se realizó de dos maneras. La primera manera fue determinando si el desplazamiento final del registro fuera menor a 0.005 cm en su valor absoluto. La segunda manera fue escoger el registro con un menor desplazamiento final luego de realizar todas las iteraciones dentro del proceso de selección de frecuencias de filtrado que se presenta en el siguiente paso.
11. Se seleccionan las frecuencias de filtrado a partir de los siguientes parámetros: frecuencias de la ventana máxima de filtrado, frecuencias de la ventana mínima de filtrado, número de intervalos y número de ciclos; parámetros que se explican a continuación.

    El proceso de filtrado comienza con la selección de una frecuencia inicial para un filtrado pasa bajas (fl1) y para un filtrado pasa altas (fh1); además de esto se seleccionan una máxima frecuencia para un filtrado pasa bajas (fl2) y una mínima frecuencia para un filtrado pasa altas (fh2). También se debe seleccionar un número de intervalos "n" que indica el número de ventanas de filtrado a iterar entre la ventana máxima y mínima seleccionadas (definidas por fh1 y fl1 y por fh2 y fl2, respectivamente) (veáse Figura C.1). Así, el proceso iterativo consta de n+1 ventanas de filtrado dentro de las cuales se buscará la mayor ventana que cumpla con los requisitos implantados en el paso 10 del procedimiento de filtrado, o la ventana que presente un menor desplazamiento al final del registro con el fin de encontrar un mínimo local.

    Finalmente, se define un número de ciclos de iteración, que define cuantas veces se realizará el proceso iterativo pre definido. De esta manera, si no se encuentra una ventana de iteración que cumpla con el umbral máximo de desplazamiento descrito en el paso anterior, luego de las n+1 iteraciones del primer ciclo, comenzará un nuevo ciclo con un máximo de n+1 nuevas iteraciones alrededor de la ventana que registró el mínimo desplazamiento absoluto dentro del primer ciclo. Este proceso se deberá repetir de acuerdo al número de ciclos definidos.
12. Al final del proceso de filtrado, se almacena el registro filtrado con mejores resultados.

Así, siguiendo el proceso de filtrado descrito previamente, se filtraron los acelerogramas registrados en 3 direcciones para los eventos a utilizar para la definición del árbol lógico de ecuaciones de atenuación para cada uno de los 4 ambientes tectónicos definidos dentro del modelo.

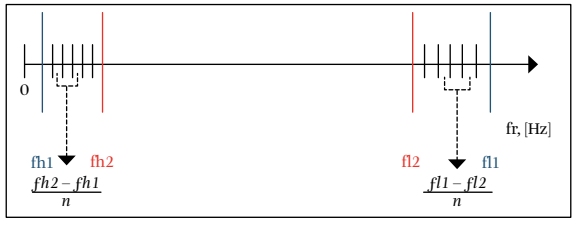



**Figura C.1** Esquema de iteración para el proceso de filtrado

## Referencias

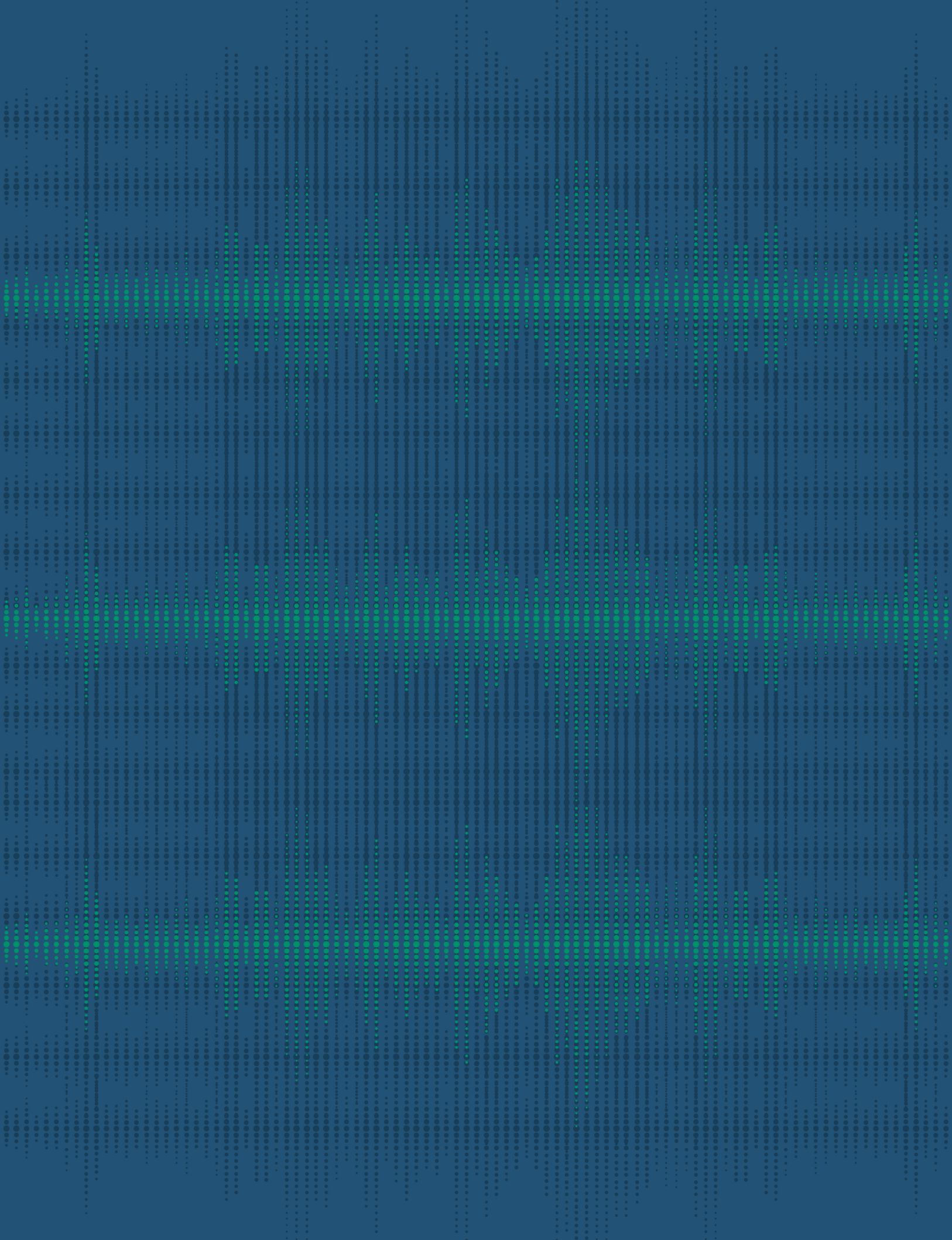
Akkar, S., & Bommer, J. (2006). "Influence of long-period filter cut-off on elastic spectral displacements". *Earthquake engineering and structural dynamics(35)*, 1145-1165. doi:10.1002/eqe.577

Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S., Donahue, J. L. (2013). "PEER NGA-West2 Database". USA

Boore, D. M. (s.f.). "Properties of Butterworth Filters as Used in My Record-Processing Software" (TSPP).

Cooley, J. W., Lewis, P. A., & Welch, P. D. (1967). "Historical Notes on the Fast Fourier Transform". IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 15(76-79), 2. doi:10.1109/tau.1967.1161903

Douglas, J., & Boore, D. (2011). "High-frequency filtering of strong-motion records". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 395-409



# D

# Distribuciones de magnitud-frecuencia en fuentes corticales tipo área

En este anexo se presentan, para cada fuente, las distribuciones de magnitud - frecuencia obtenida.

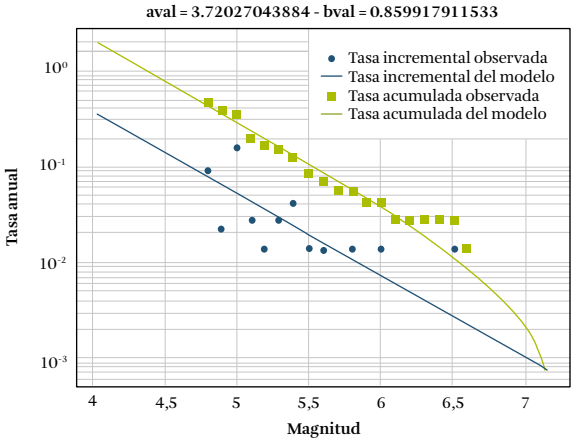



**Figura D.1.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Cocuy (cc_01)

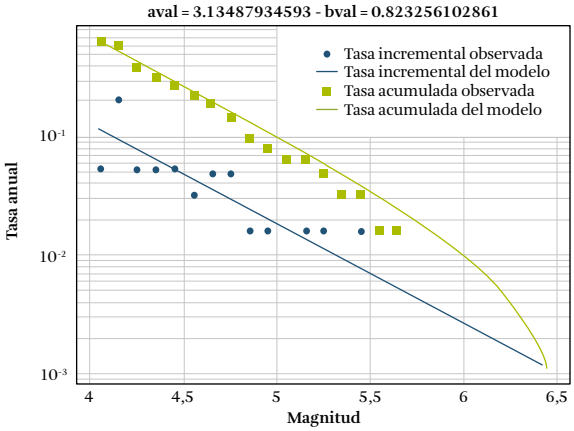



**Figura D.2.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Altiplano Cundiboyacense (cc_02)

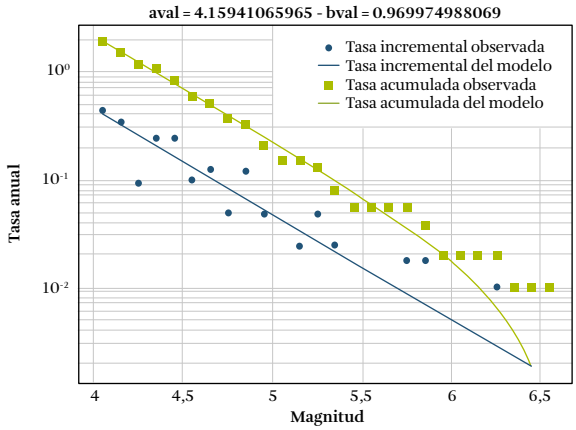



**Figura D.3.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Piedemonte Orinoquía (cc_03)

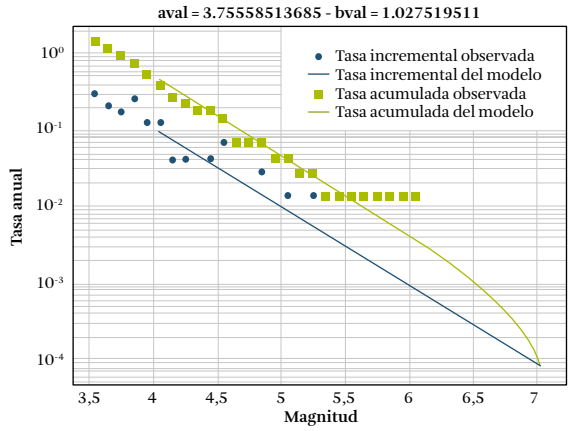



**Figura D.4.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Piedemonte Amazonía (cc_04)

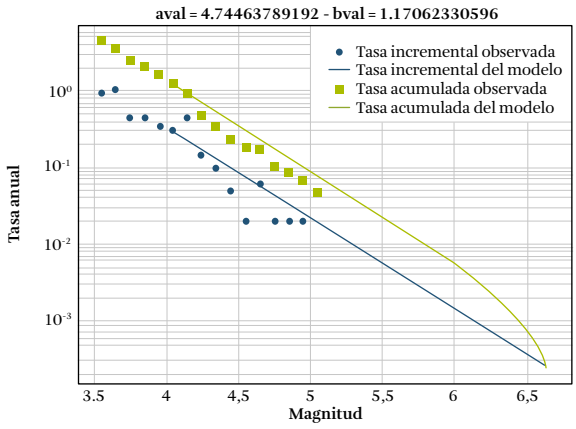



**Figura D.5.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Sur Cordillera Oriental (cc_05)

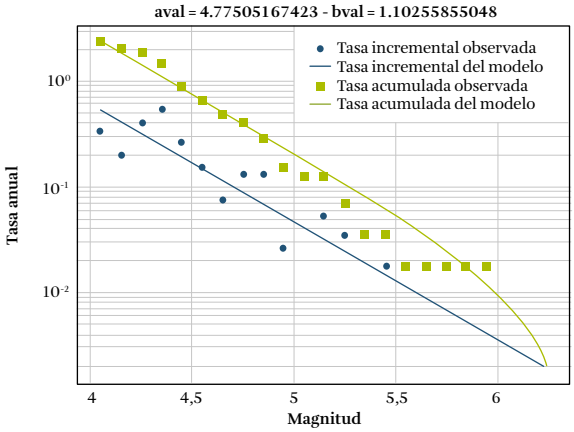



**Figura D.6.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Guajira - Paraguaná (cc_51)

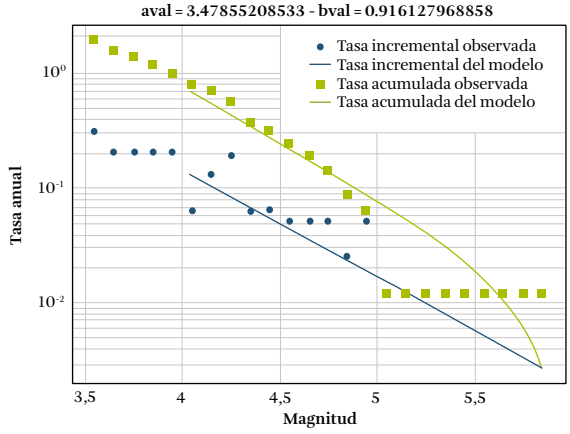



**Figura D.7.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Perijá - Sierra Nevada (cc_52)

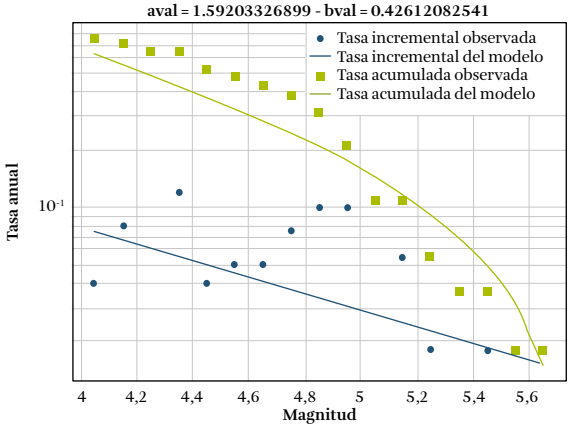



**Figura D.8.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Depresión de Maracaibo (cc_53)

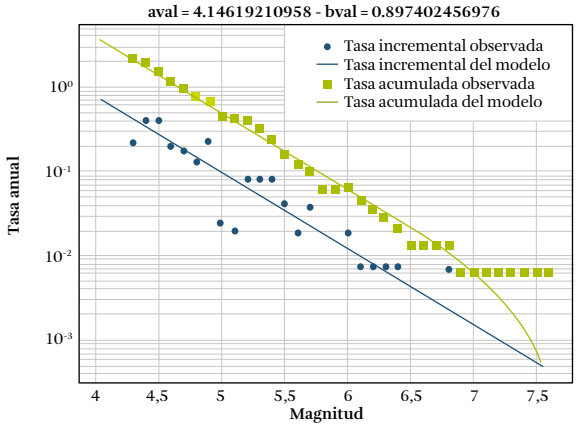



**Figura D.9.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Andes de Mérida (cc_55)

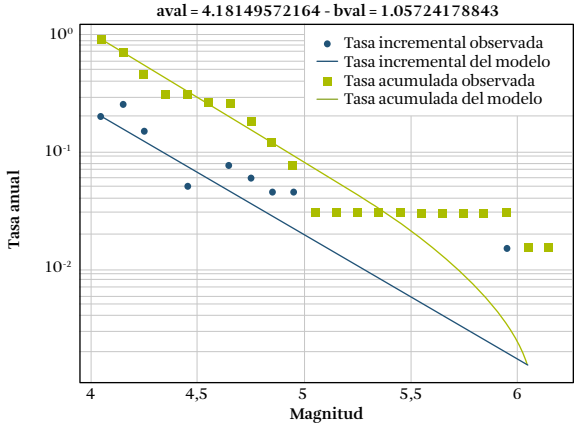



**Figura D.10.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Norte Santander (cc_56)

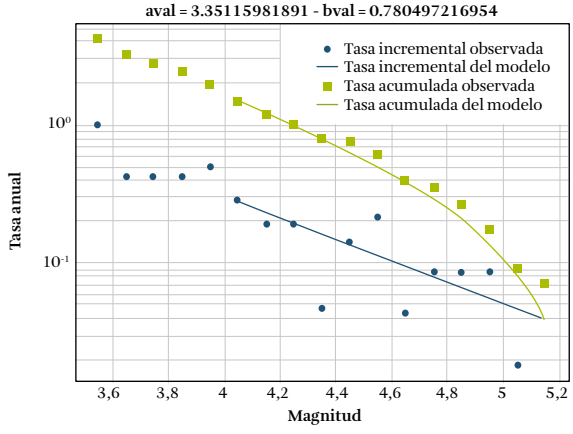



**Figura D.11.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Magdalena Medio (cc_57)

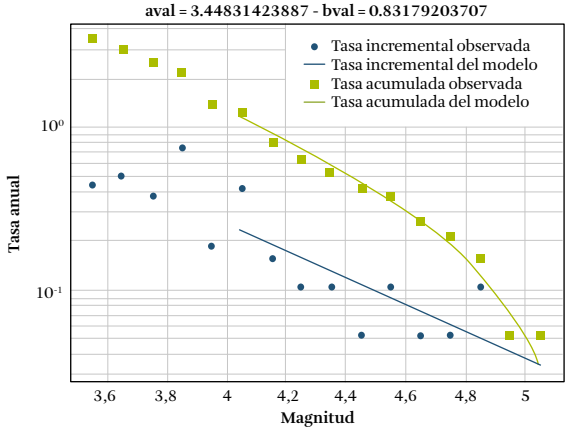



**Figura D.12.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Cienagas del Caribe (cc_58)

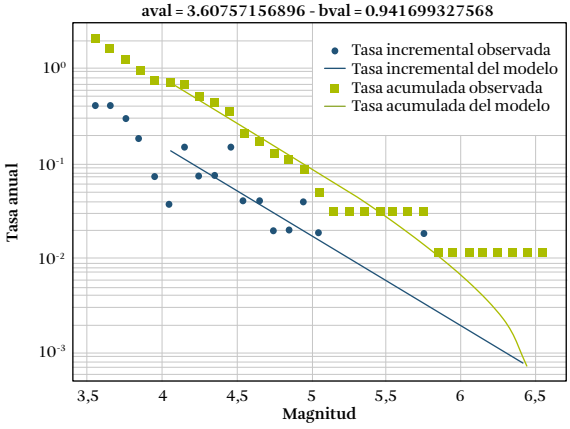



**Figura D.13.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Sábanas costeñas (cc_59)

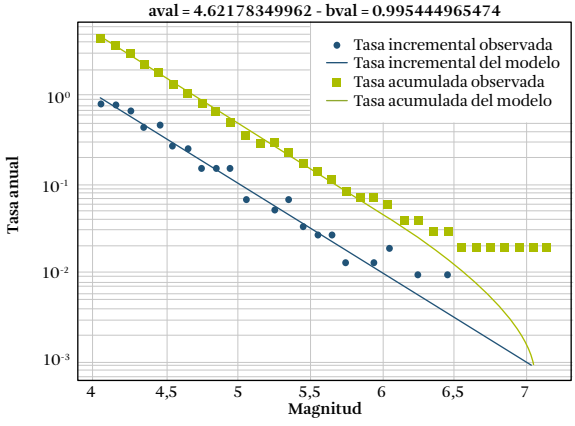



**Figura D.14.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Pacífico Norte (Darién) (cc_61)

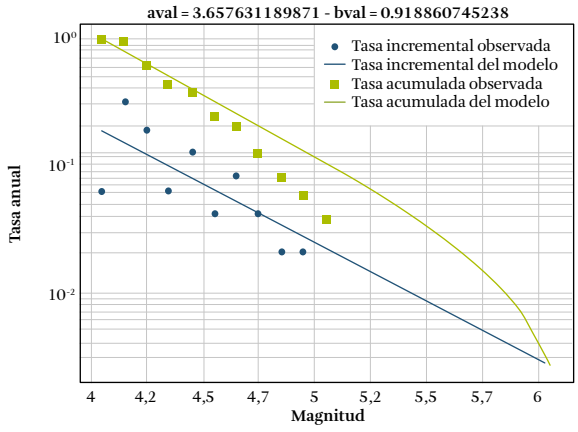



**Figura D.15.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Norte Cordillera Central (cc_64)

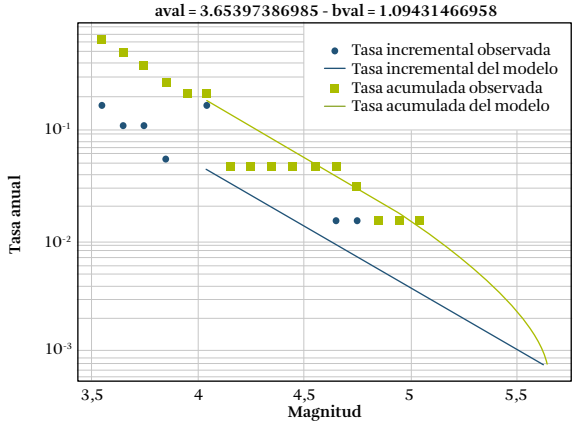



**Figura D.16.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Valle Alto del Magdalena (cc_66)

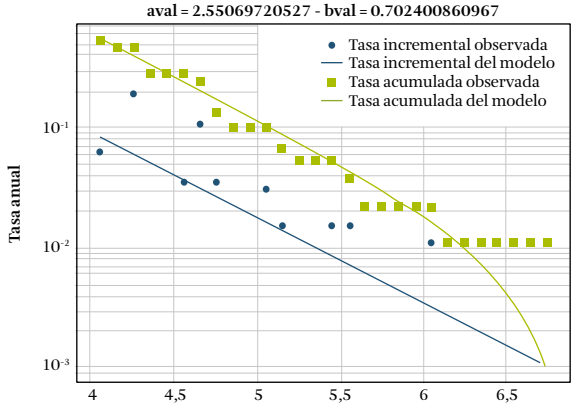



**Figura D.17.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Central Cordillera Central (cc_67)

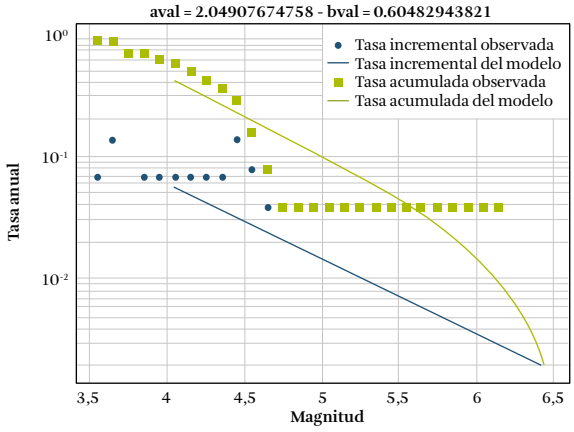



**Figura D.18.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Cauca - Patía (cc_68)

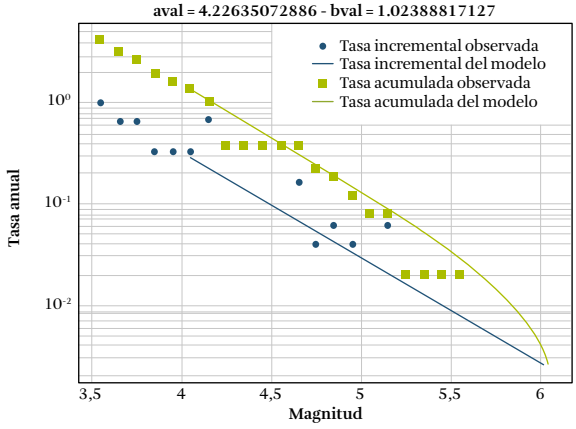



**Figura D.19.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Pacifico Central (cc_69)

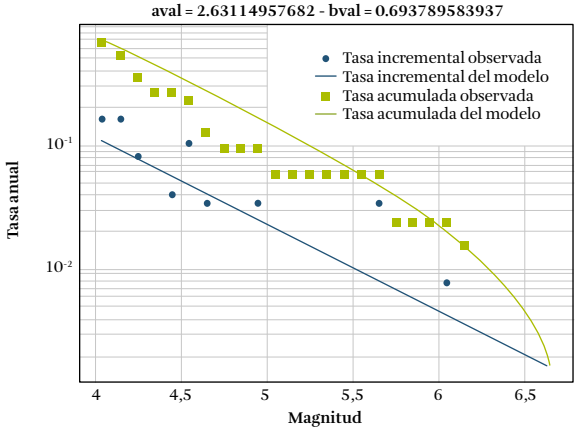



**Figura D.20.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Zona Andina Nariñense (cc_70)

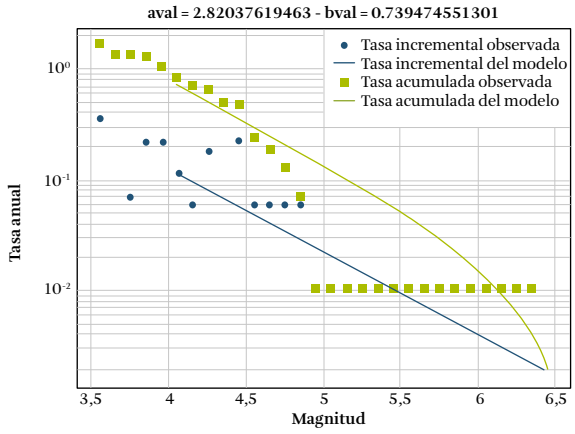



**Figura D.21.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Pacífico Sur (cc_71)

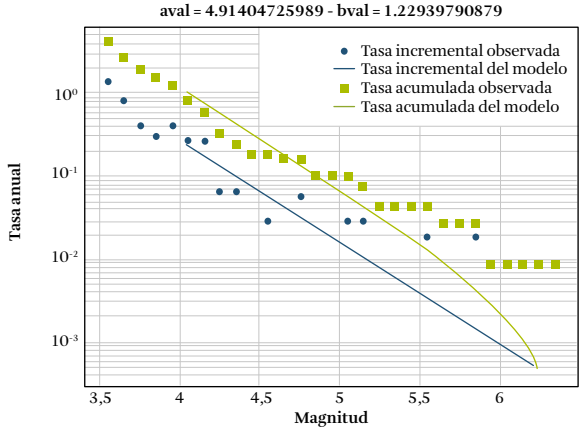



**Figura D.22.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Piedemonte Ecuatoriano (cc_72)

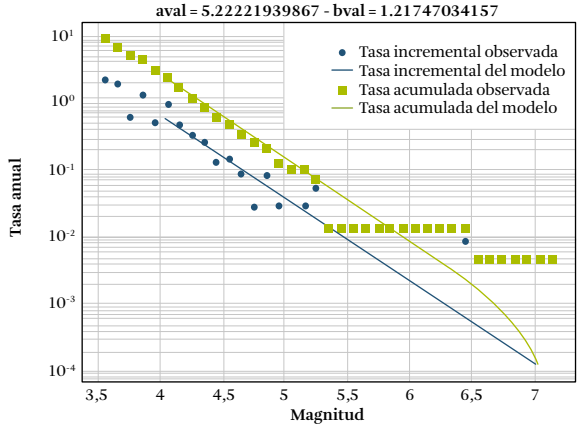



**Figura D.23.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Sierra oriental ecuatoriana (cc_73)

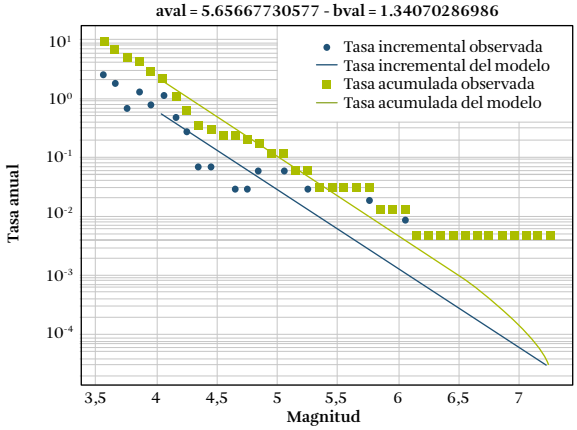



**Figura D.24.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Sierra occidental ecuatoriana (cc_74)

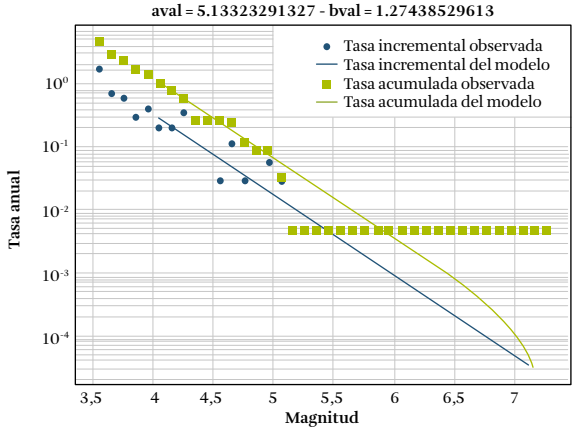



**Figura D.25.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Pacífico Ecuatoriano (cc_75)

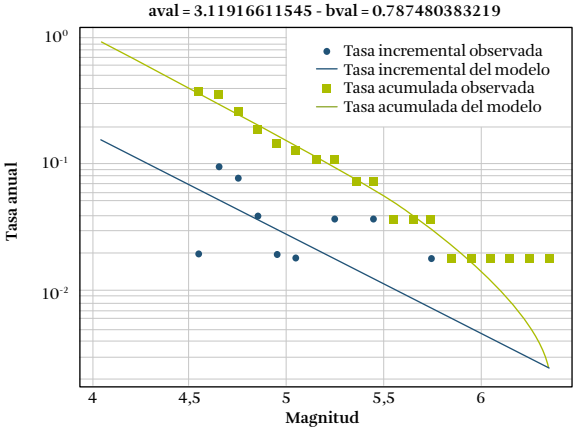



**Figura D.26.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Transversal de Falcón (cc_76)

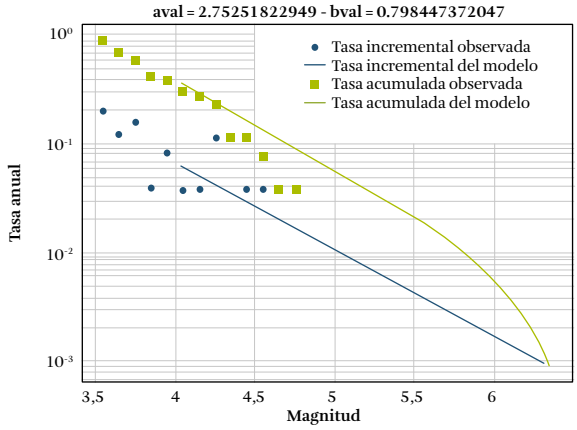



**Figura D.27.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Transversal del Caribe (Oca) (cc_77)

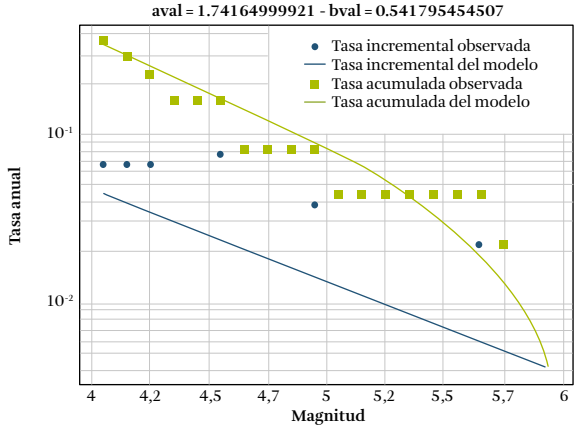



**Figura D.28.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Insular San Andrés (cc_78)

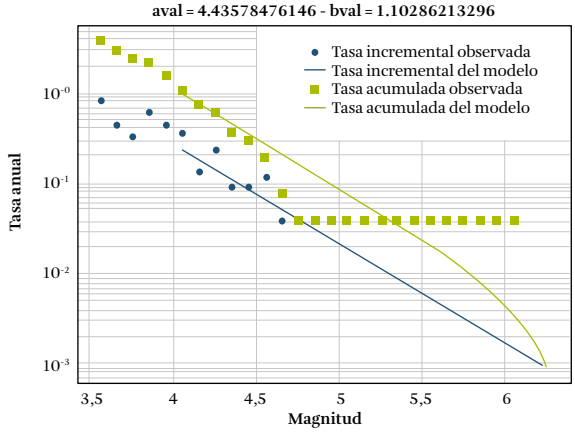



**Figura D.29.** Distribución de magnitud y frecuencia; fuente Craton (cc_79)

E

# Distribuciones de magnitud-frecuencia en macrozonas del modelo de sismicidad suavizado

En este anexo se presentan, para cada macro zona, las distribuciones de magnitud - frecuencia obtenida.

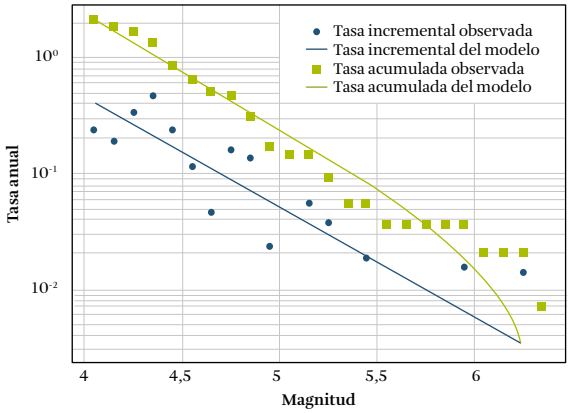



**Figura E.1.** Distribución de magnitud y frecuencia, fuente Guajira - Paraguaná (c00)

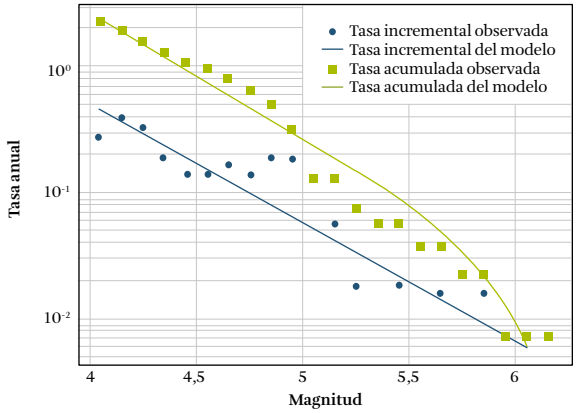



**Figura E.3.** Distribución de magnitud y frecuencia, fuente Nororiental (c02)

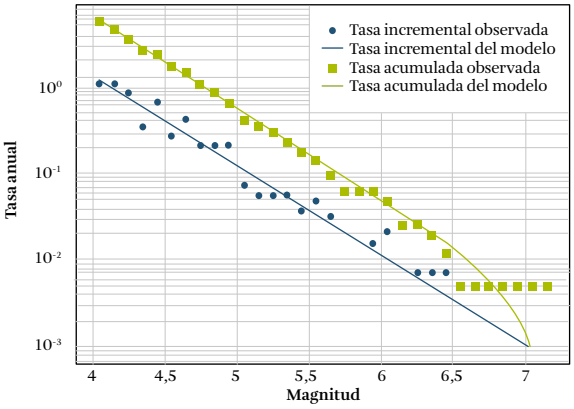



**Figura E.2.** Distribución de magnitud y frecuencia, fuente Pacífica (c01)

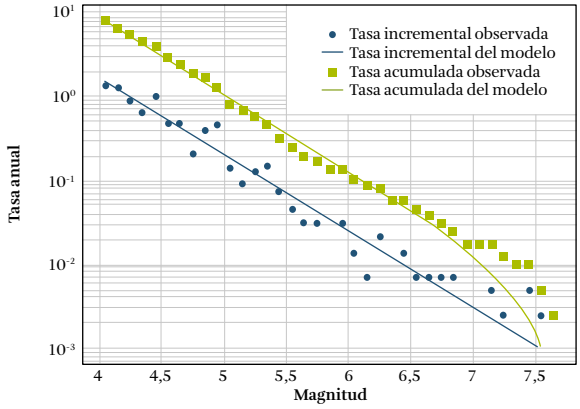



**Figura E.4.** Distribución de magnitud y frecuencia, fuente Piedemonte oriental (c03)

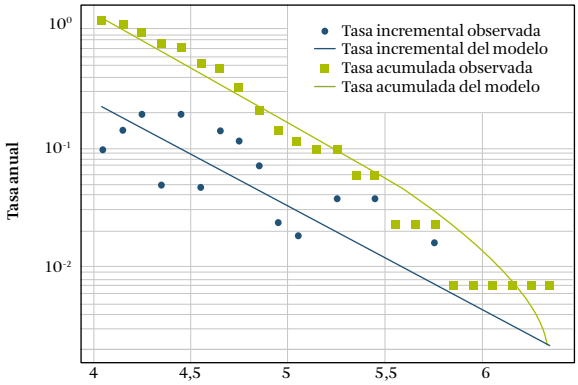



**Figura E.5.** Distribución de magnitud y frecuencia, fuente Oca - Falcón (c04)

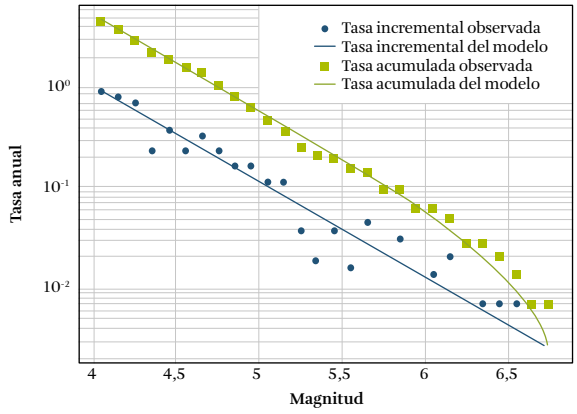



**Figura E.6.** Distribución de magnitud y frecuencia, fuente Andina (c05)

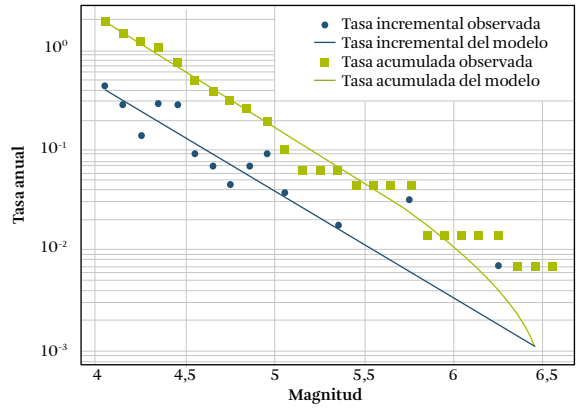



**Figura E.7.** Distribución de magnitud y frecuencia, fuente Caribe (c06)

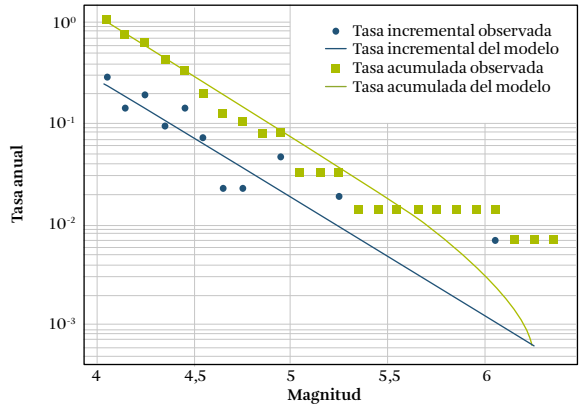



**Figura E.8.** Distribución de magnitud y frecuencia, fuente Cratón (c07)

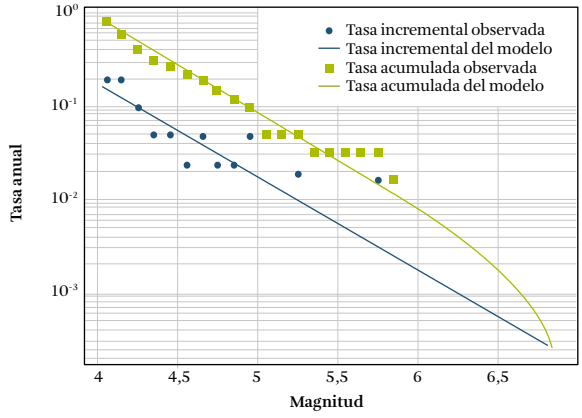
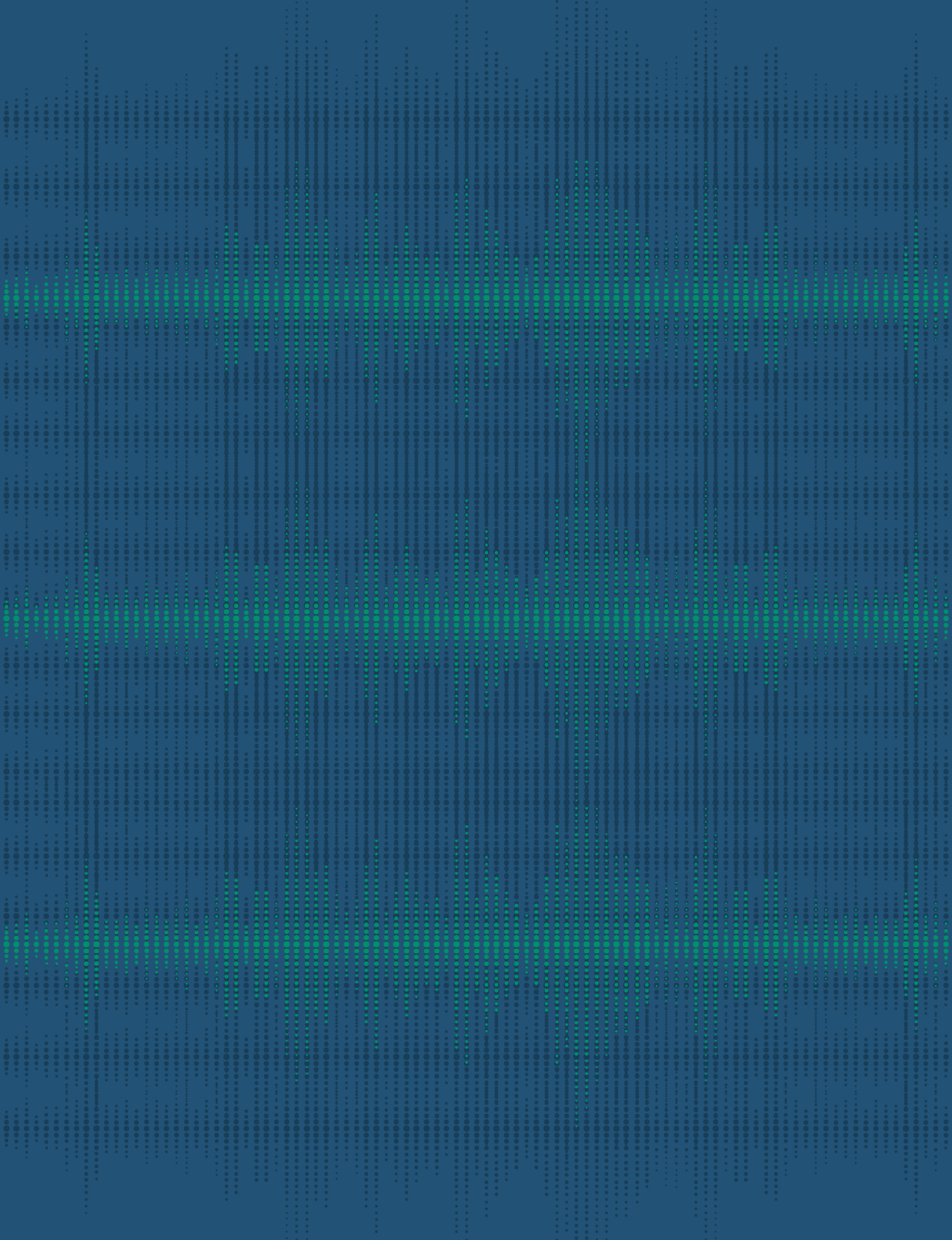



**Figura E.9.** Distribución de magnitud y frecuencia, fuente Panamá (p00)



F

# Distribuciones de magnitud-frecuencia en fallas activas

En este anexo se presentan, para cada falla, las distribuciones de magnitud - frecuencia obtenidas.

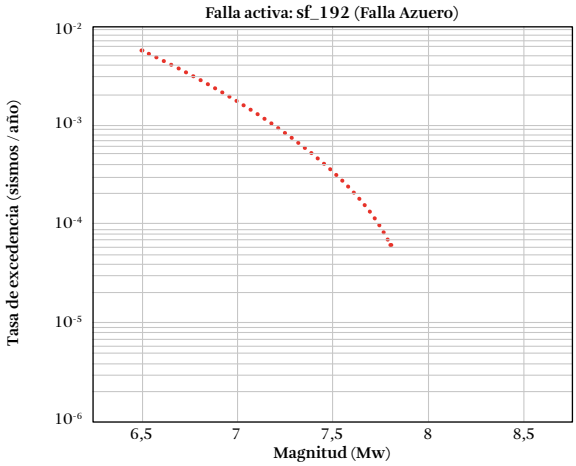



**Figura F.1.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Azuero Fault (sf_192)

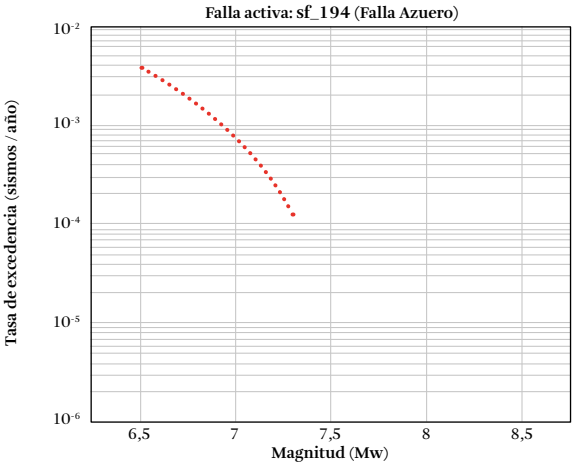



**Figura F.2.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Azuero Fault (sf_194)

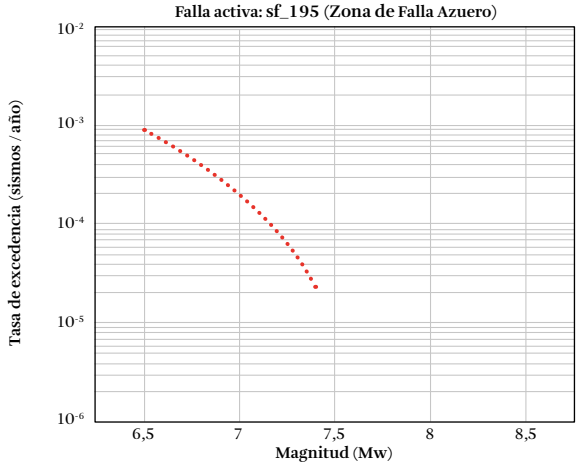



**Figura F.3.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Azuero Fault Zone (sf_195)

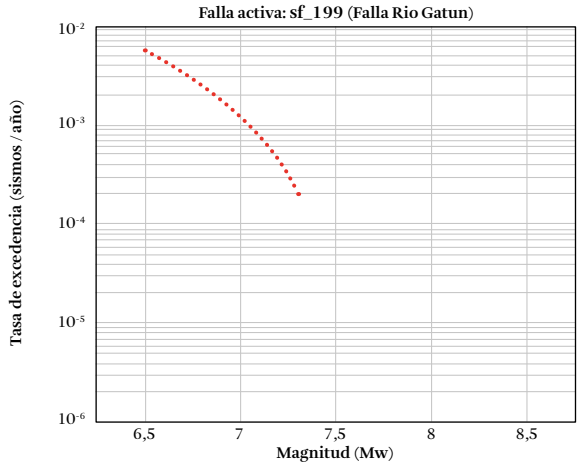



**Figura F.4.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Rio Gatun Fault (sf_199)

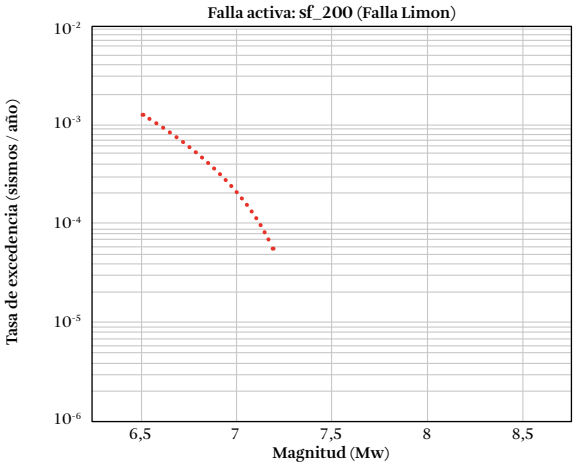



**Figura F.5.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Limon Fault (sf_200)

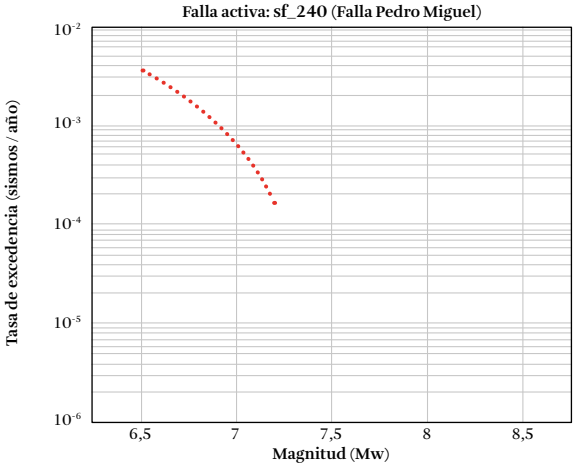



**Figura F.6.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Pedro Miguel Fault (sf_240)

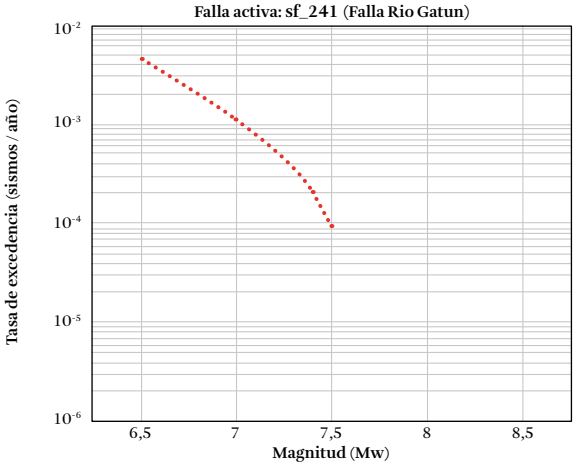



**Figura F.7.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Rio Gatun Fault (sf_241)

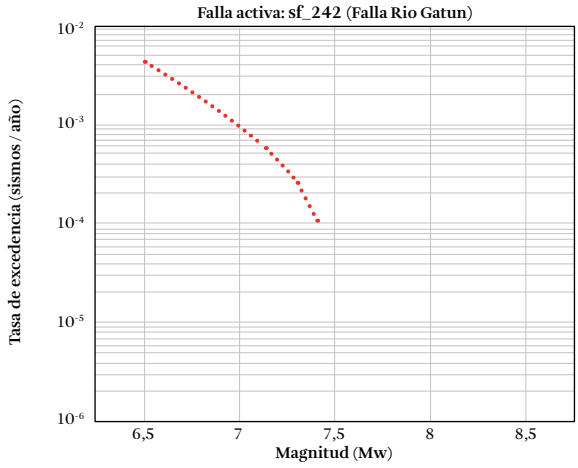



**Figura F.8.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Rio Gatun Fault (sf_242)

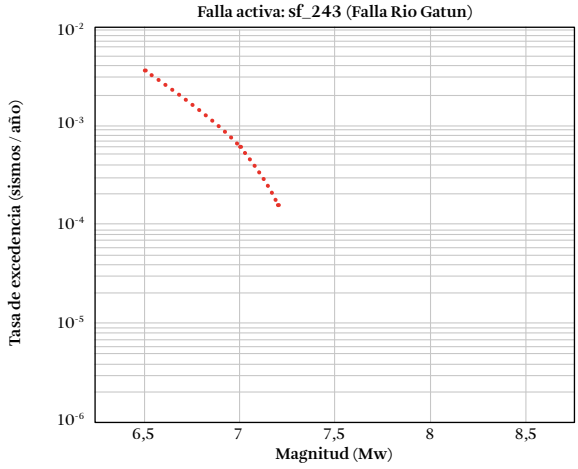



**Figura F.9.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Rio Gatun Fault (sf_243)

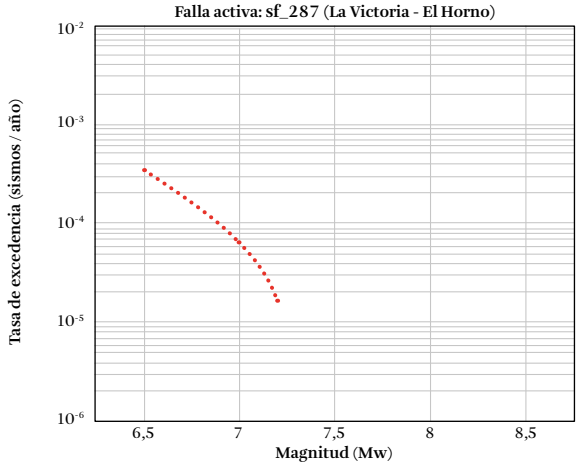



**Figura F.10.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla La Victoria - El Horno (sf_287)

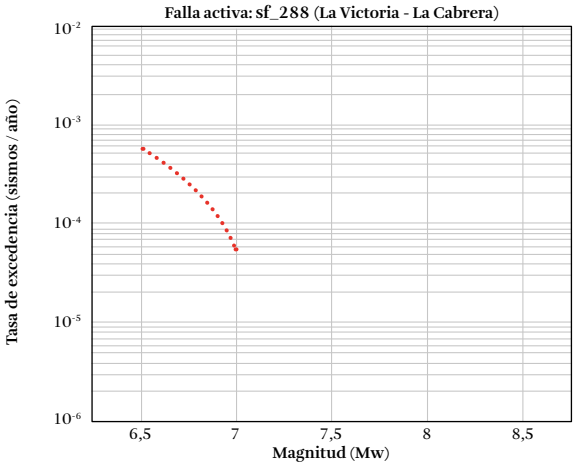



**Figura F.11.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla La Victoria - La Cabrera (sf_288)

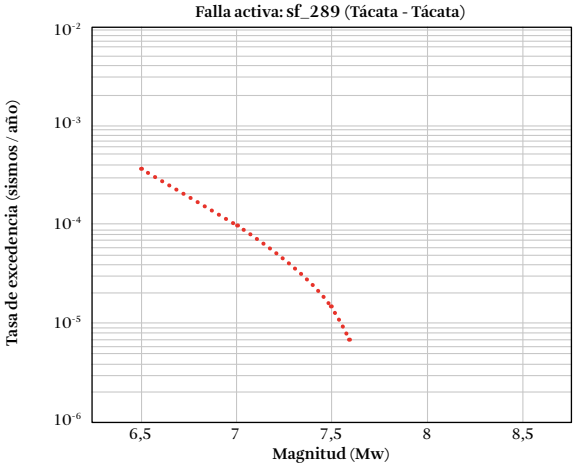



**Figura F.12.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Tácata - Tácata (sf_289)

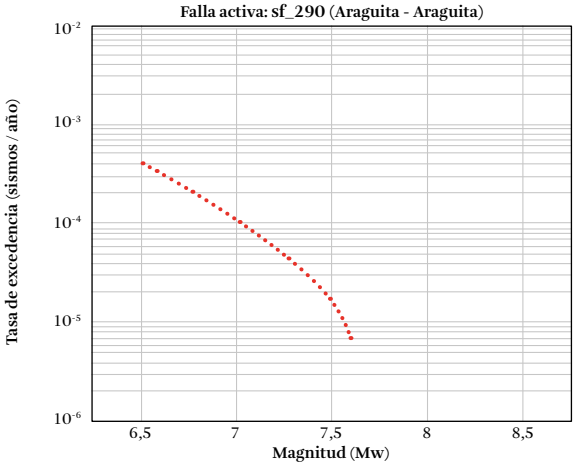



**Figura F.13.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Araguita - Araguita (sf_290)

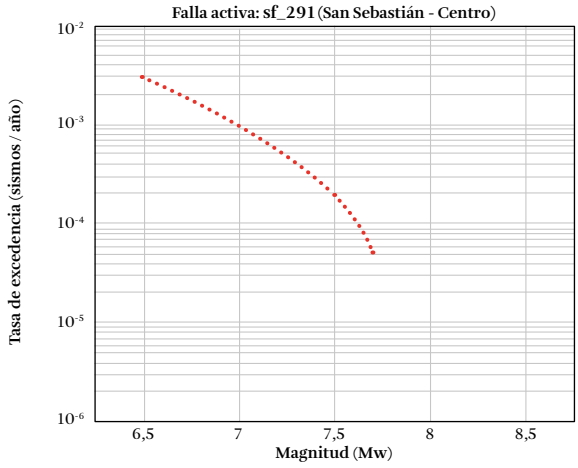



**Figura F.14.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla San Sebastián - Centro (sf_291)

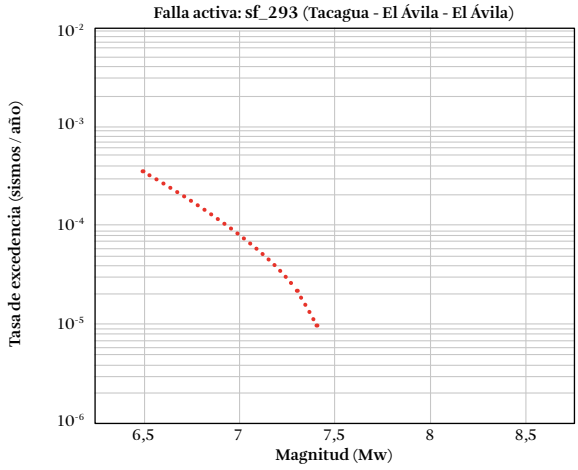



**Figura F.15.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Tacagua - El Ávila - El Ávila (sf_293)

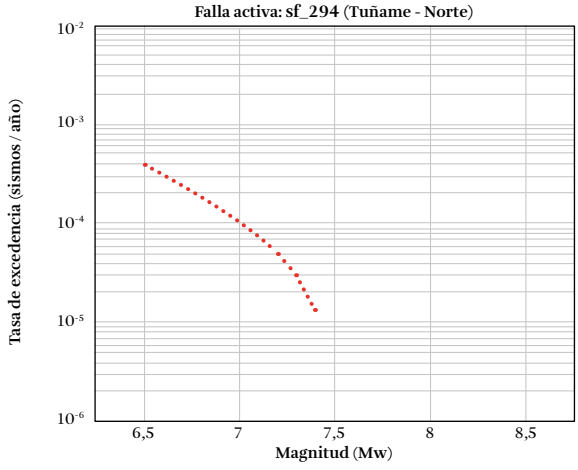



**Figura F.16.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Tuñame - Norte (sf_294)

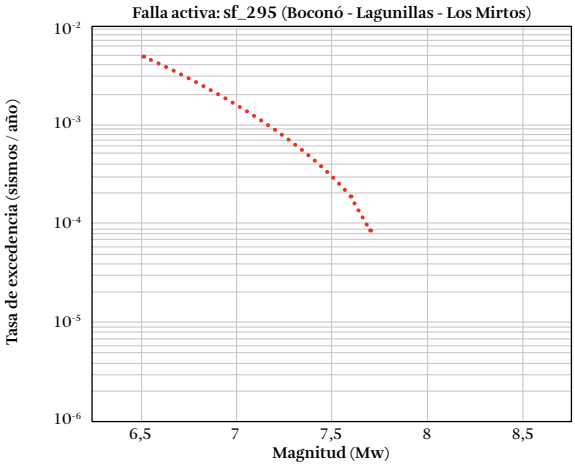



**Figura F.17.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Boconó - Lagunillas - Los Mirtos (sf_295)

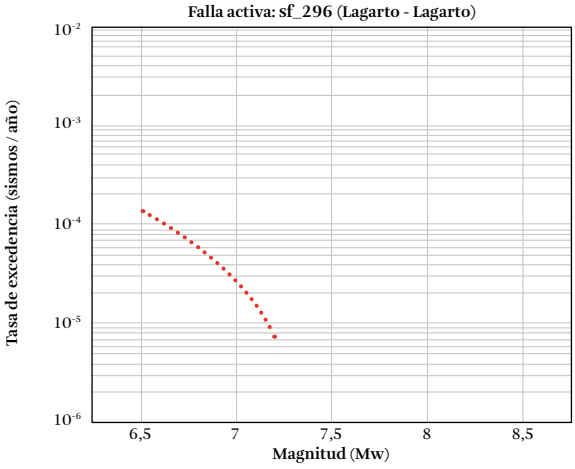



**Figura F.18.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Lagarto - Lagarto (sf_296)

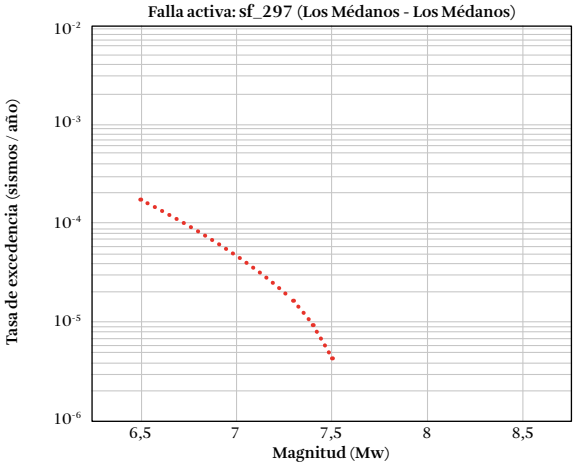



**Figura F.19.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Los Médanos - Los Médanos (sf_297)

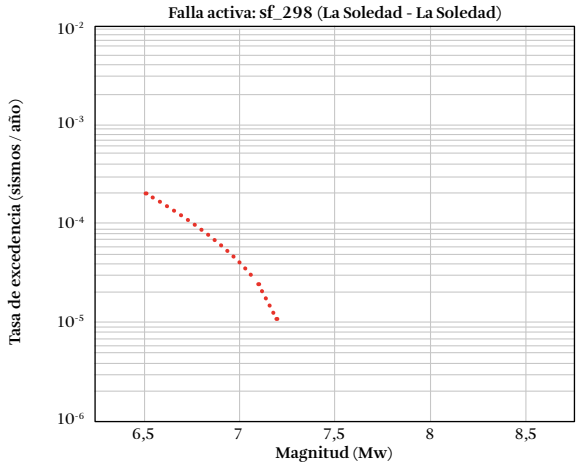



**Figura F.20.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla La Soledad - La Soledad (sf_298)

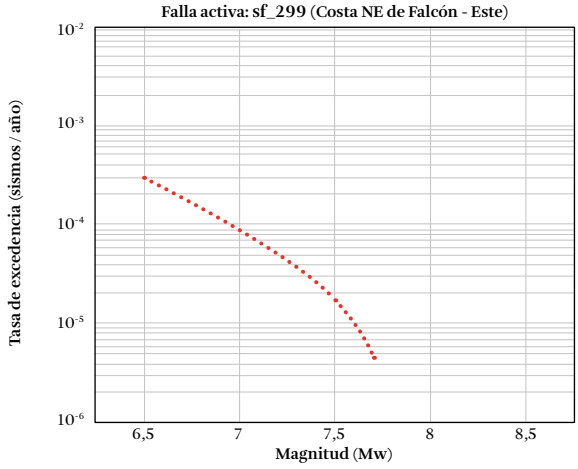



**Figura F.21.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Costa NE de Falcón - Este (sf_299)

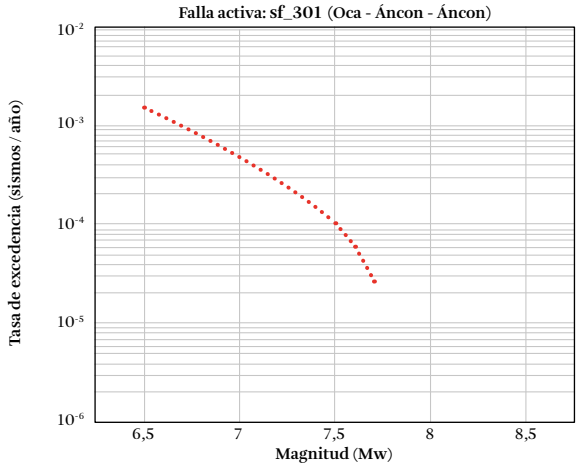



**Figura F.22.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Oca - Ancón - Ancón (sf_301)

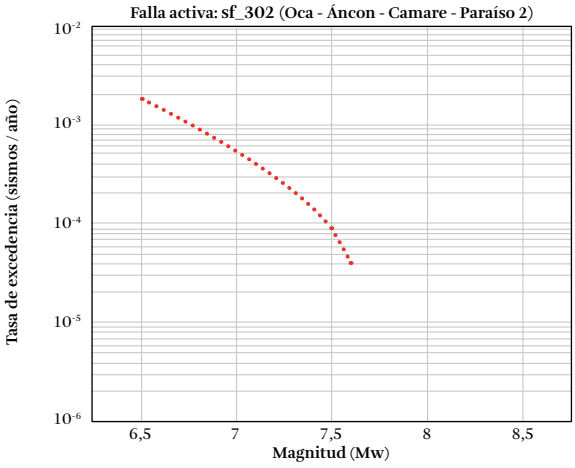



**Figura F.23.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Oca - Ancón - Camare - Paraíso 2 (sf_302)

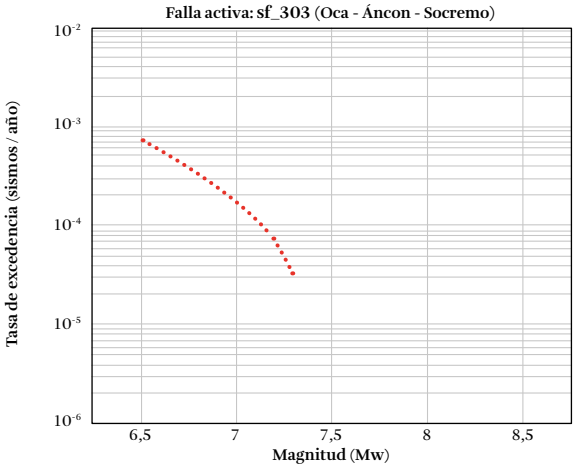



**Figura F.24.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Oca - Ancón - Socremo (sf_303)

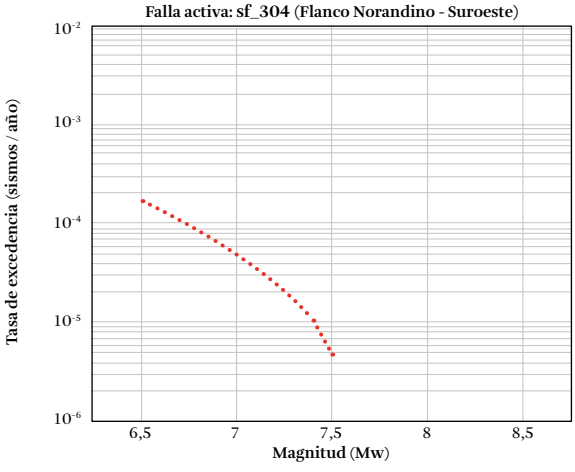



**Figura F.25.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Norandino - Suroeste (sf_304)

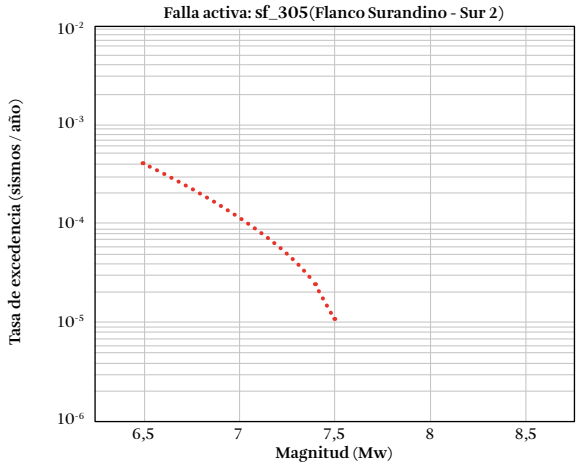



**Figura F.26.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Surandino - Sur 2 (sf_305)

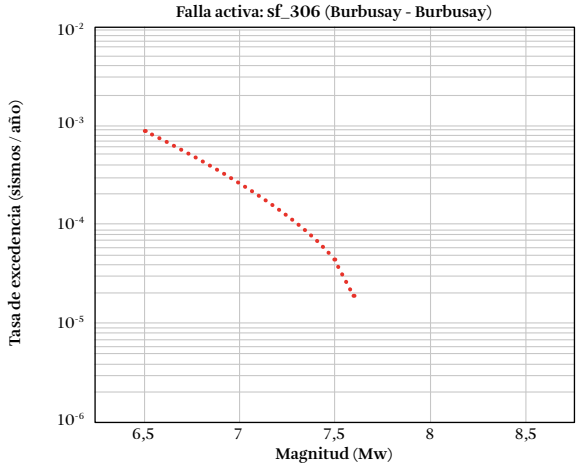



**Figura F.27.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Burbusay - Burbusay (sf_306)

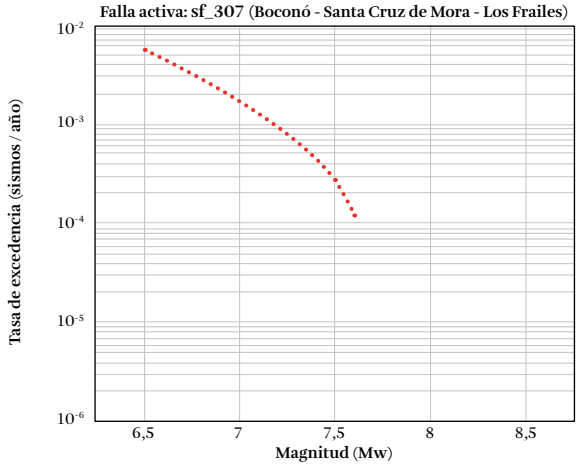



**Figura F.28.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Boconó - Santa Cruz de Mora - Los Frailes (sf_307)

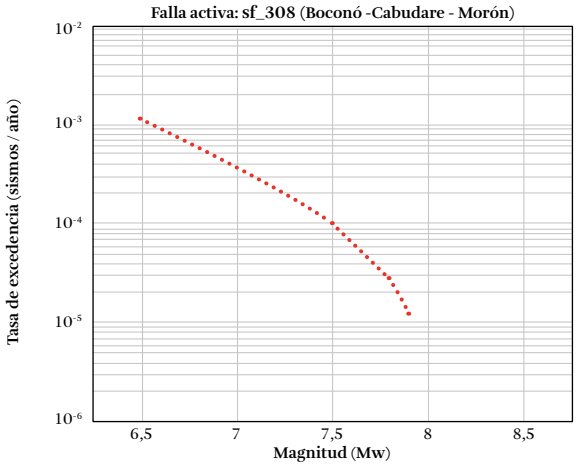



**Figura F.29.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Boconó - Cabudare - Morón (sf_308)

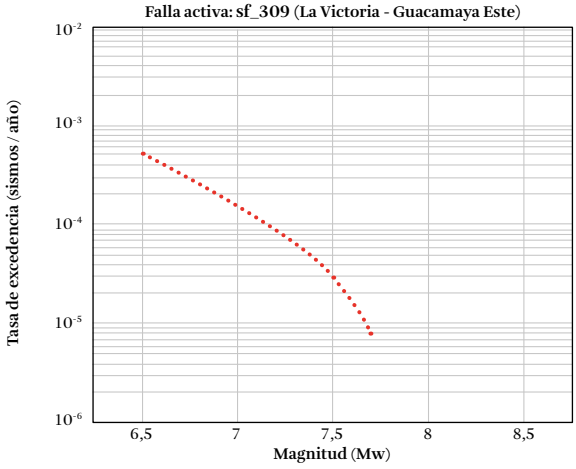



**Figura F.30.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla La Victoria - Guacamaya Este (sf_309)

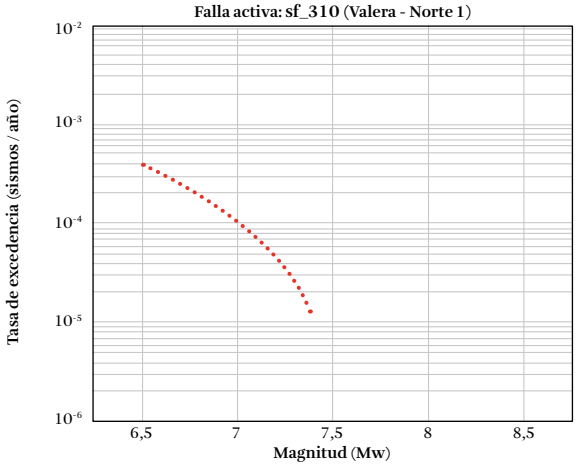



**Figura F.31.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Valera - Norte 1 (sf_310)

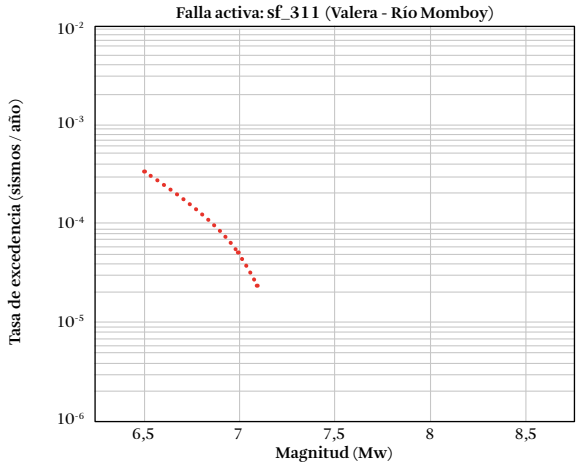



**Figura F.32.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Valera - Río Momboy (sf_311)

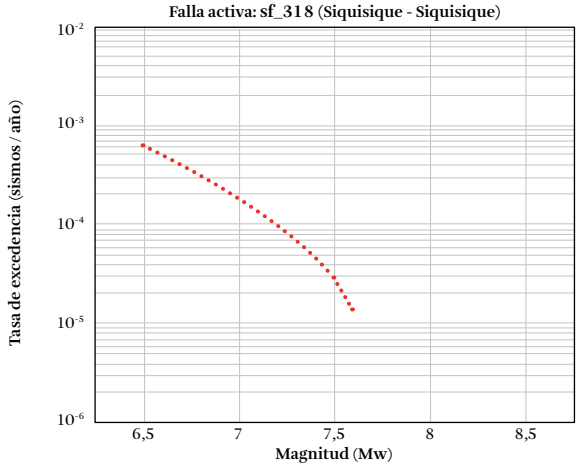



**Figura F.33.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Siquisique - Siquisique (sf_318)

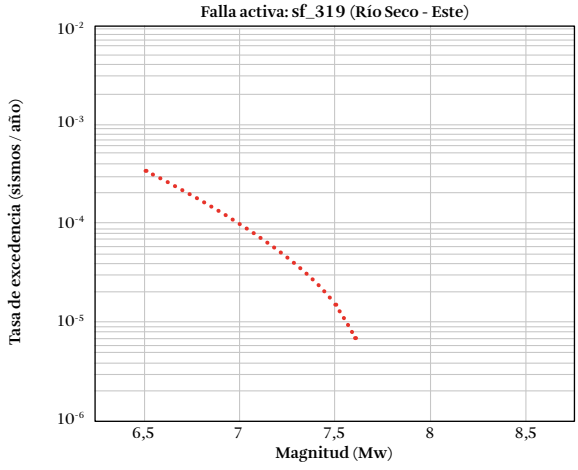



**Figura F.34.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Rio Seco - Este (sf_319)

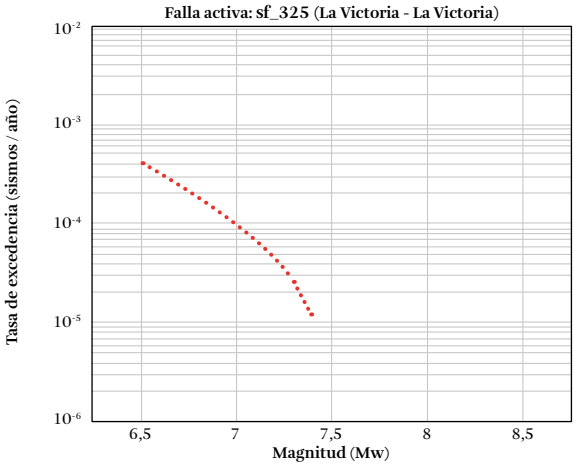



**Figura F.35.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla La Victoria - La Victoria (sf_325)

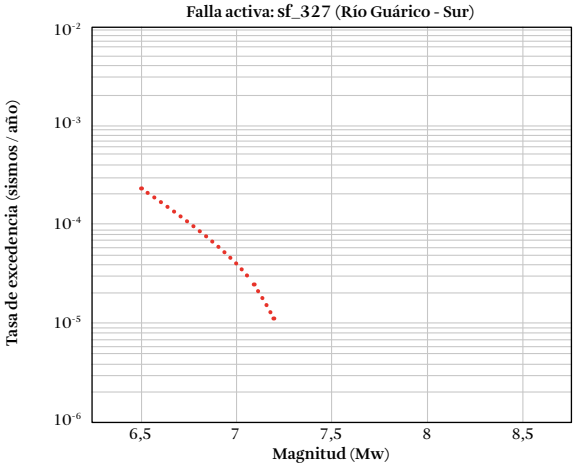



**Figura F.36.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Río Guárico - Sur (sf_327)

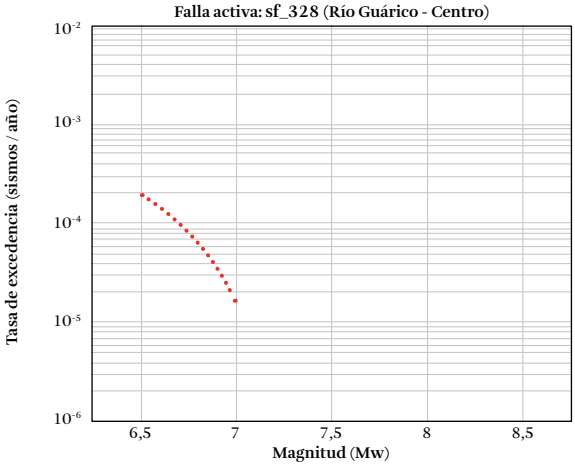



**Figura F.37.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Río Guárico - Centro (sf_328)

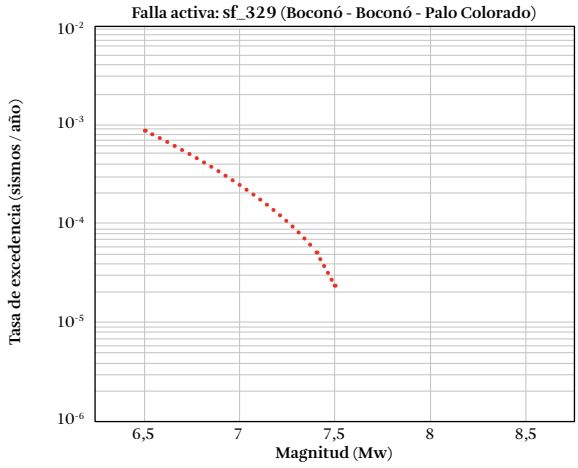



**Figura F.38.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Boconó - Boconó - Palo Colorado (sf_329)

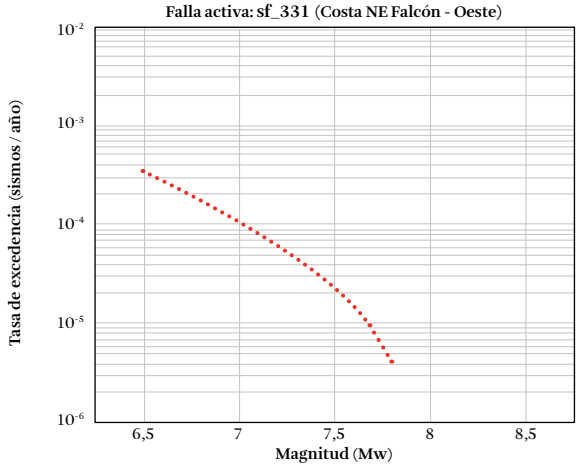



**Figura F.39.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Costa NE de Falcón - Oeste (sf_331)

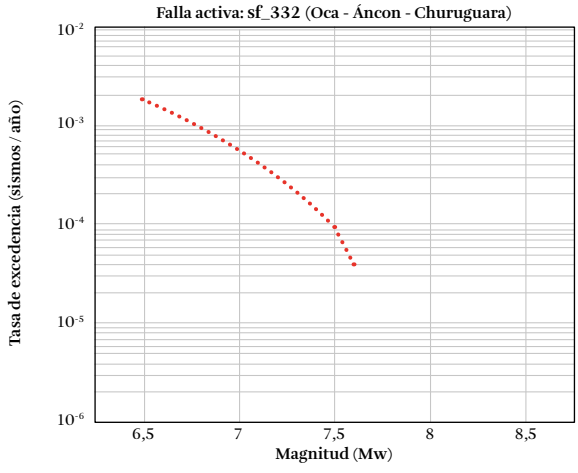



**Figura F.40.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Oca - Ancón - Churuguara (sf_332)

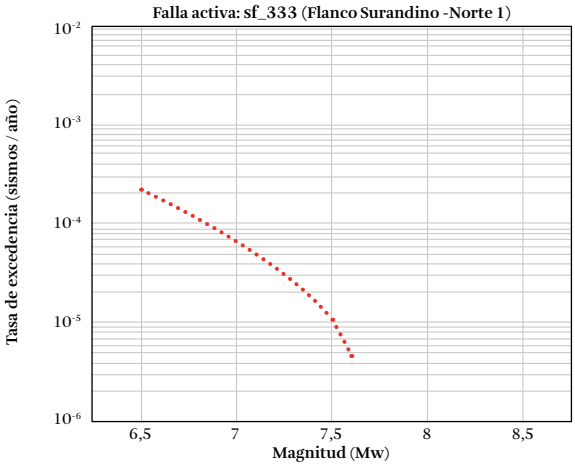



**Figura F.41.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Surandino - Norte 1 (sf_333)

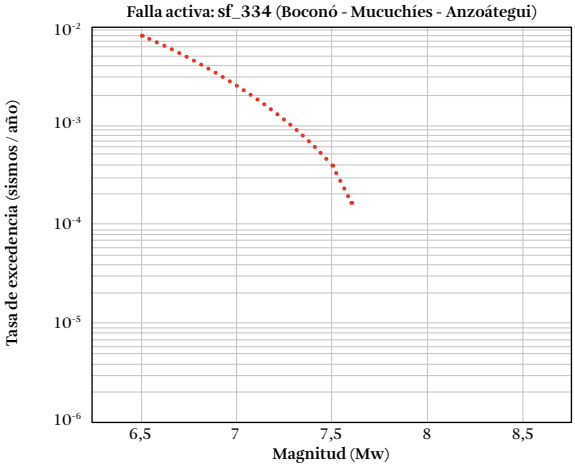



**Figura F.42.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Boconó - Mucuchíes -Anzoátegui (sf_334)

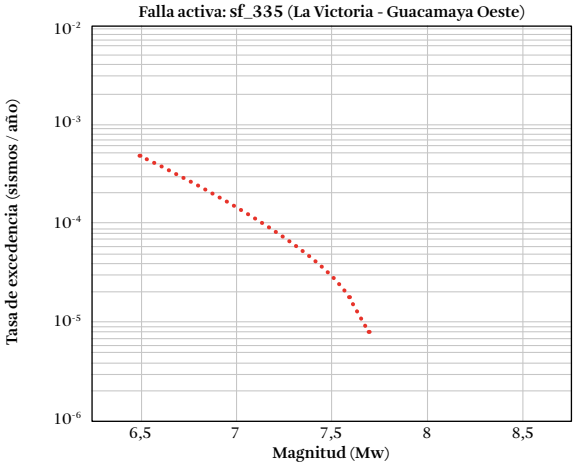



**Figura F.43.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla La Victoria - Guacamaya Oeste (sf_335)

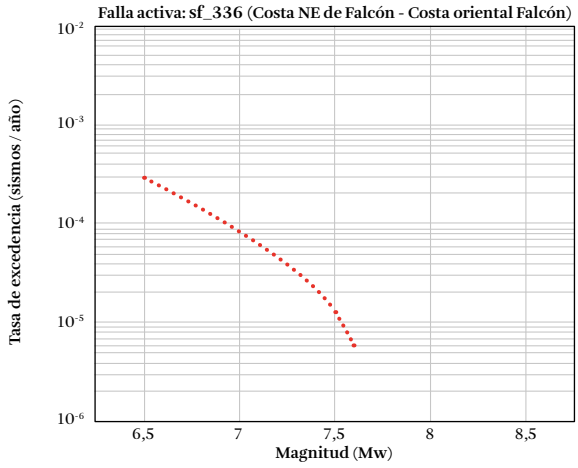



**Figura F.44.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Costa NE de Falcón - Costa Oriental Falcón (sf_336)

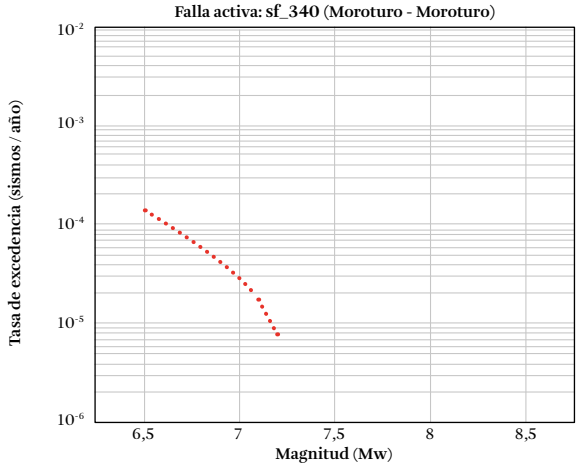



**Figura F.45.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Moroturo - Moroturo (sf_340)

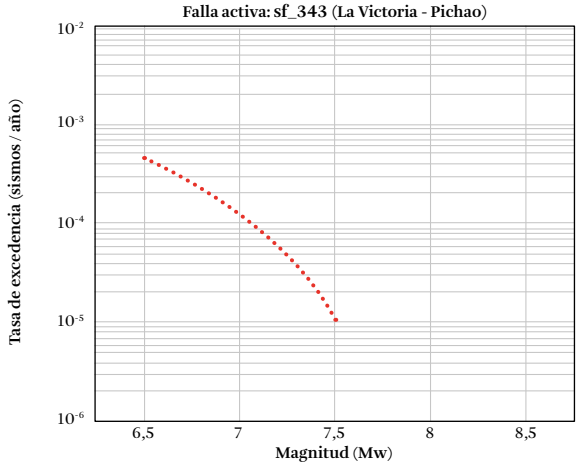



**Figura F.46.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla La Victoria - Pichao (sf_343)

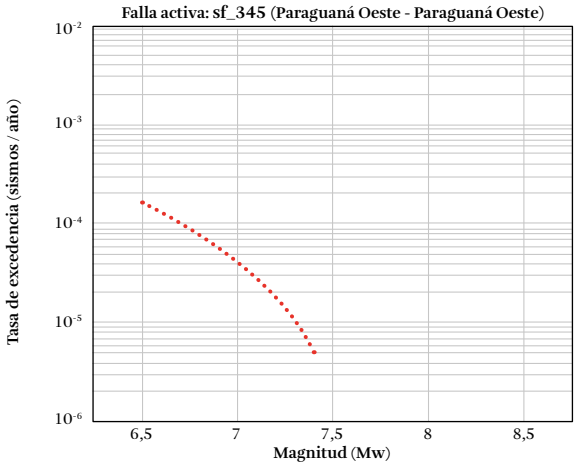



**Figura F.47.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Paraguaná Oeste - Paraguaná Oeste (sf_345)

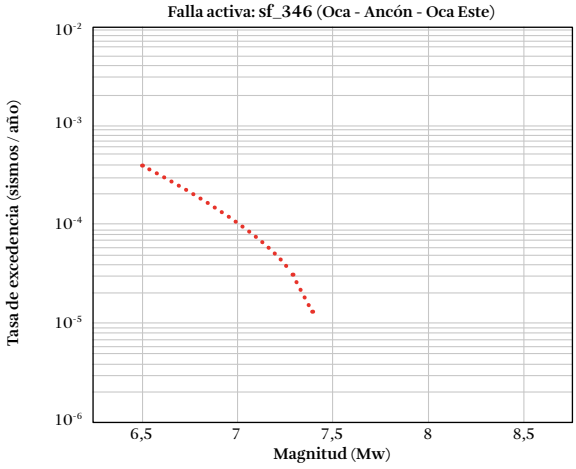



**Figura F.48.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Oca - Ancón - Oca Este (sf_346)

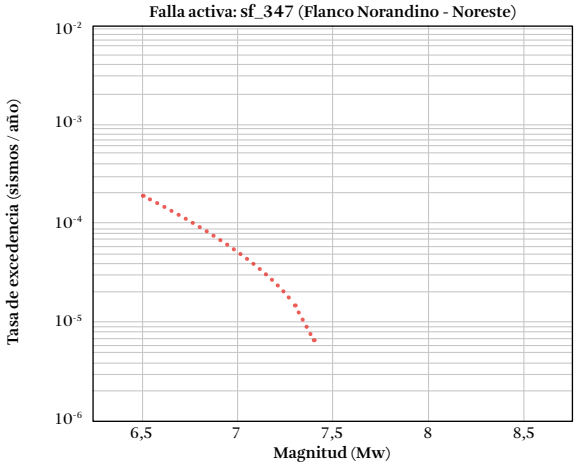



**Figura F.49.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Norandino - Noreste (sf_347)

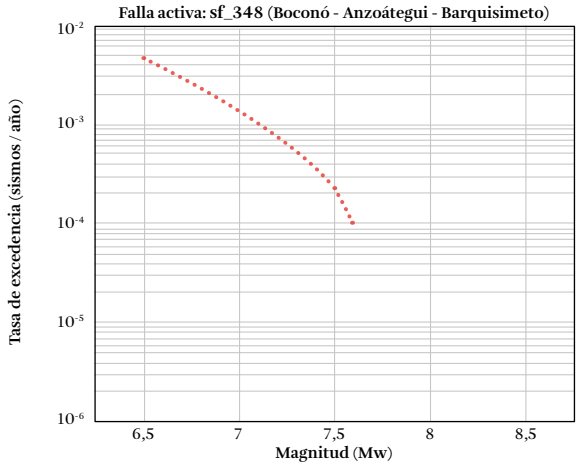



**Figura F.50.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Boconó - Anzoátegui - Barquisimeto (sf_348)

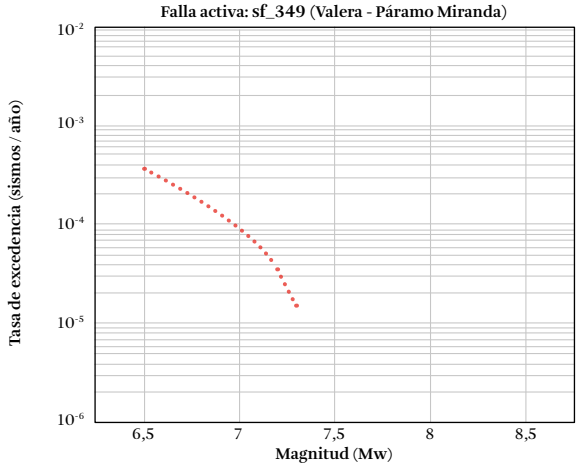



**Figura F.51.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Valera - Páramo Miranda (sf_349)

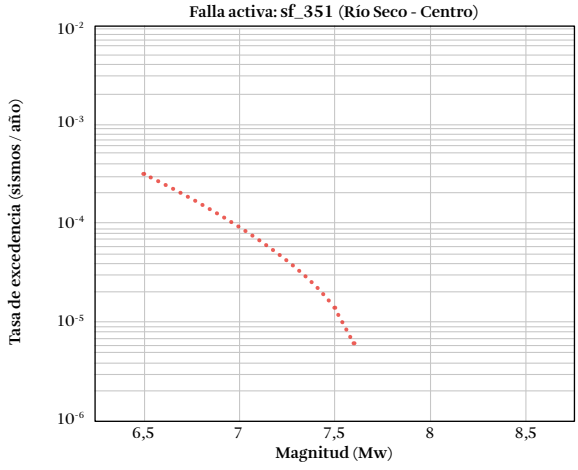



**Figura F.52.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Rio Seco - Centro (sf_351)

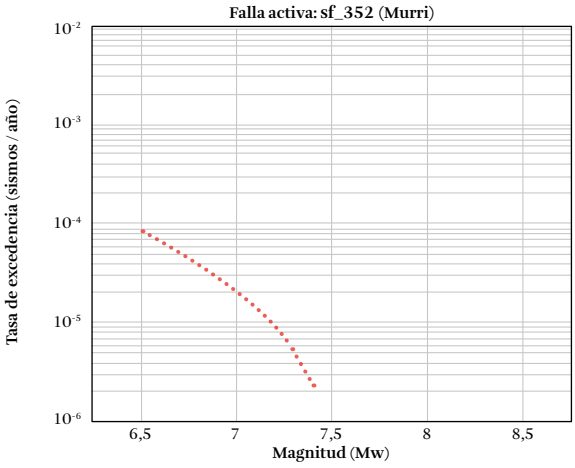



**Figura F.53.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Murri (sf_352)

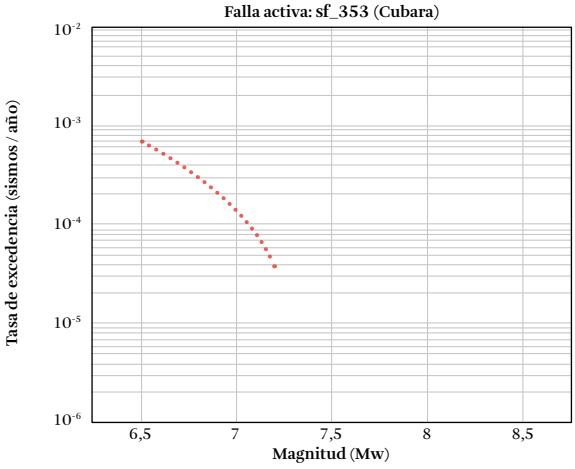



**Figura F.54.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Cubara (sf_353)

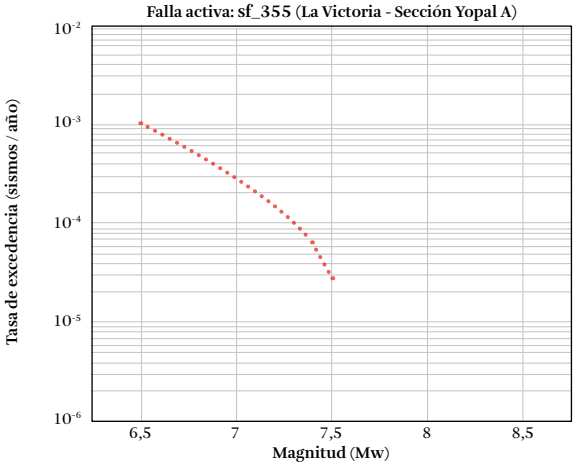



**Figura F.55.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Seccion Yopal A (sf_355)

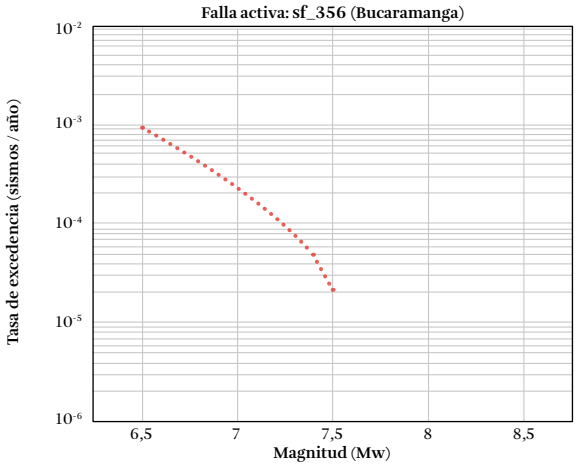



**Figura F.56.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Bucaramanga (sf_356)

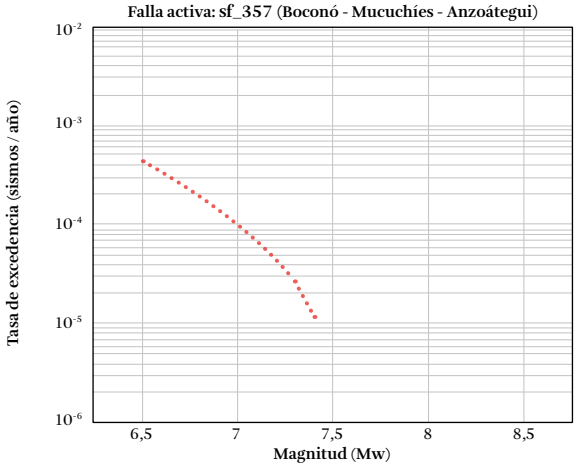



**Figura F.57.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Tucur‡a (sf_357)

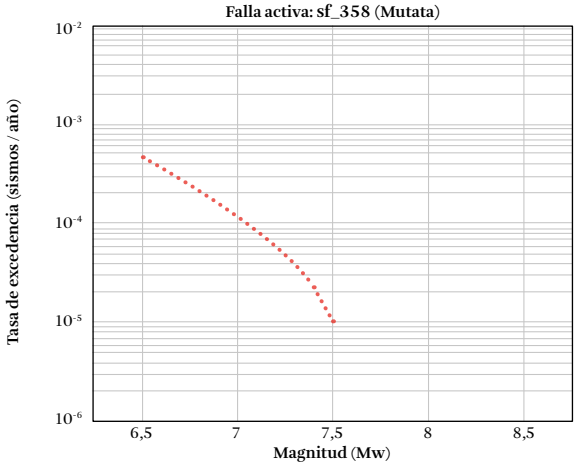



**Figura F.58.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Mutata (sf_358)

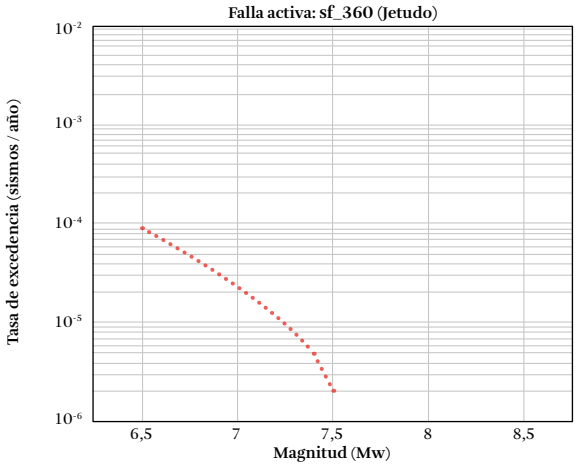



**Figura F.59.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Jetudo (sf_360)

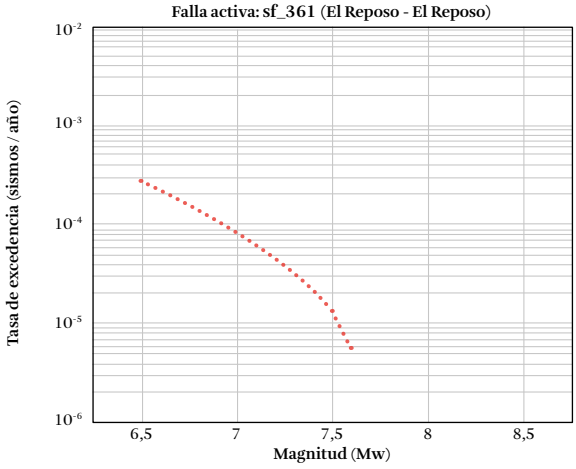



**Figura F.60.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla El Reposo - El Reposo (sf_361)

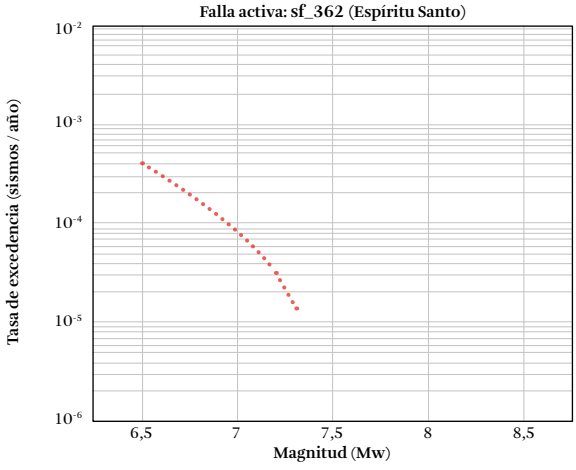



**Figura F.61.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Espiritu Santo (sf_362)

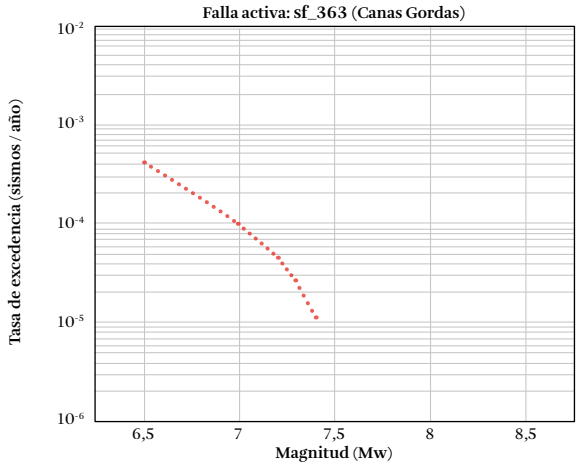



**Figura F.62.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Cañas Gordas (sf_363)

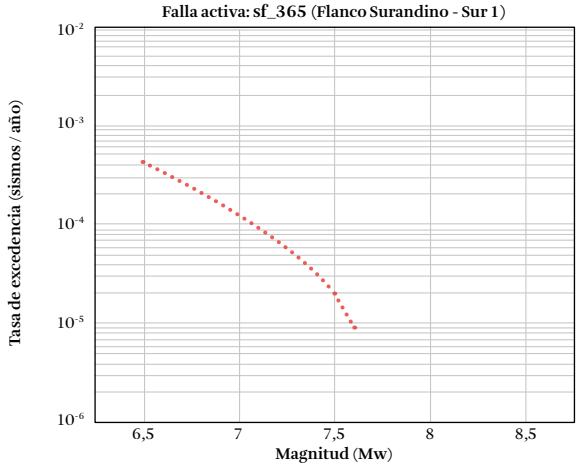



**Figura F.63.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Surandino - Sur 1 (sf_365)

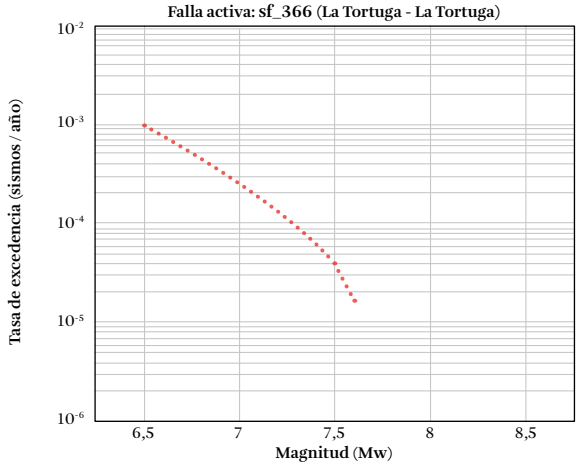



**Figura F.64.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla La Tortuga - La Tortuga (sf_366)

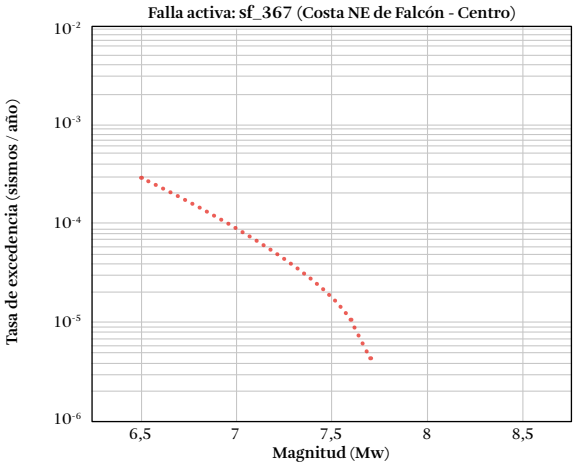



**Figura F.65.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Costa NE de Falcón - Centro (sf_367)

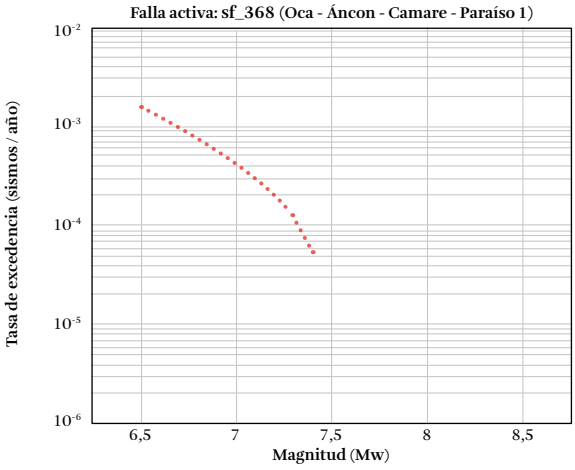



**Figura F.66.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Oca - Ancón - Camare - Paraíso 1 (sf_368)

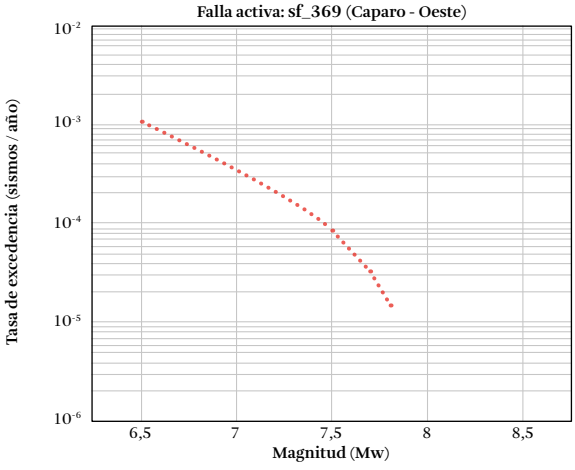



**Figura F.67.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Caparo - Oeste (sf_369)

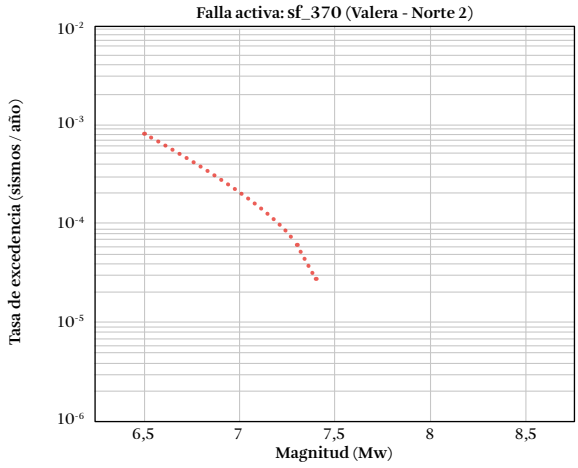



**Figura F.68.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Valera - Norte 2 (sf_370)

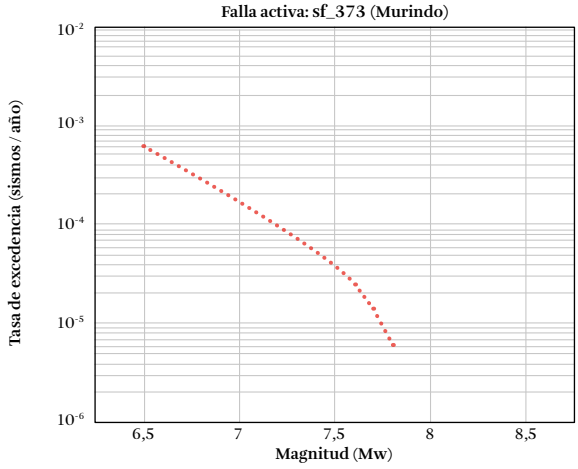



**Figura F.69.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Murindo (sf_373)

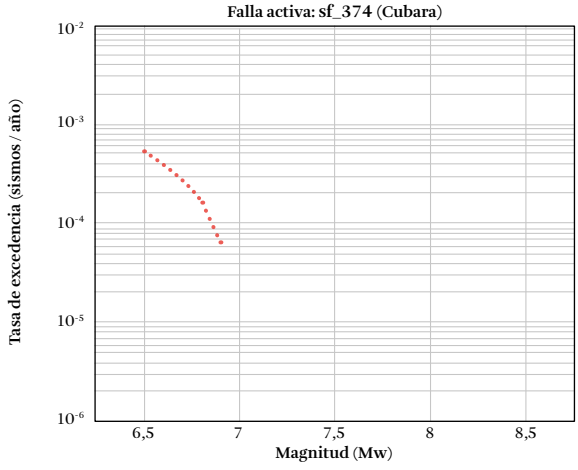



**Figura F.70.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Cubara (sf_374)

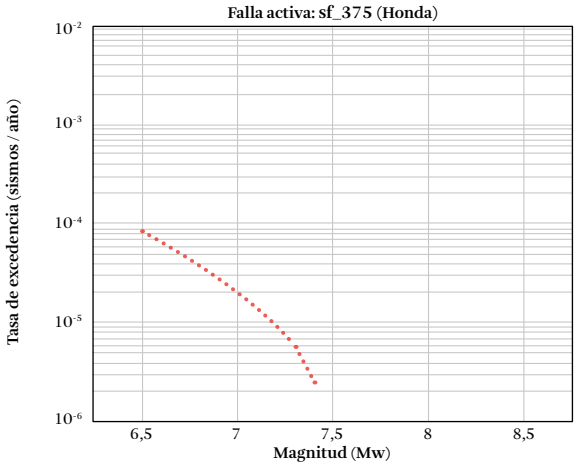



**Figura F.71.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Honda (sf_375)

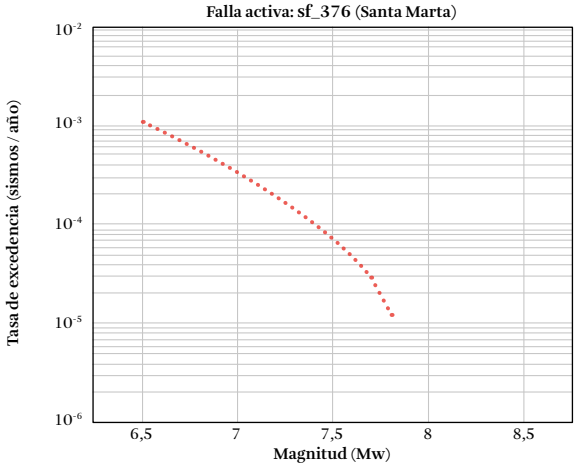



**Figura F.72.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Santa Marta (sf_376)

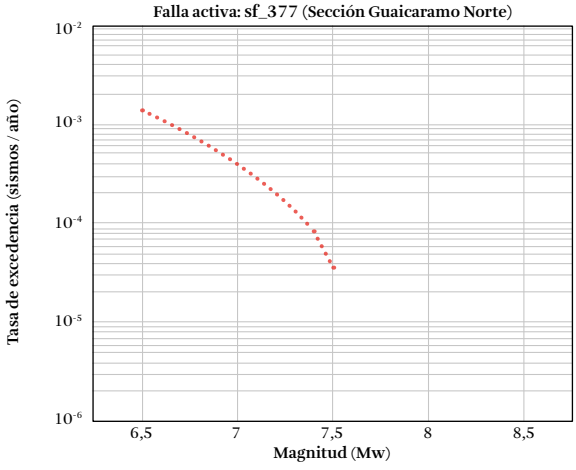



**Figura F.73.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Seccion Guaicaramo Norte (sf_377)

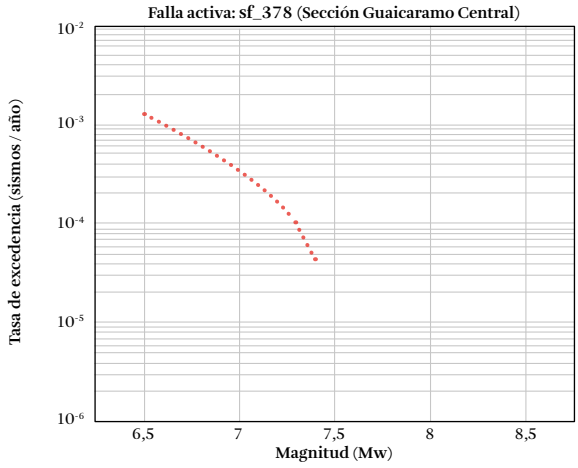



**Figura F.74.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Seccion Guaicaramo Central (sf_378)

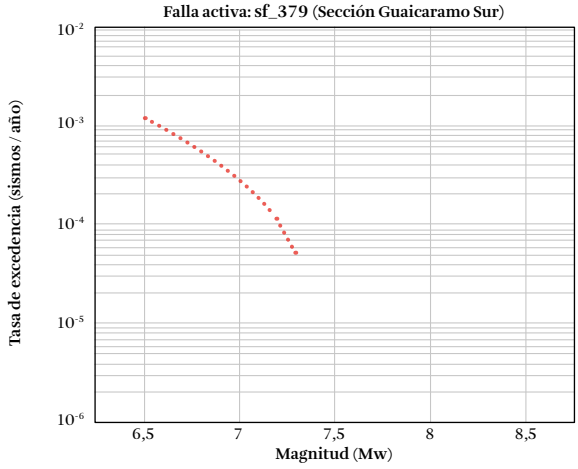



**Figura F.75.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Seccion Guaicaramo Sur

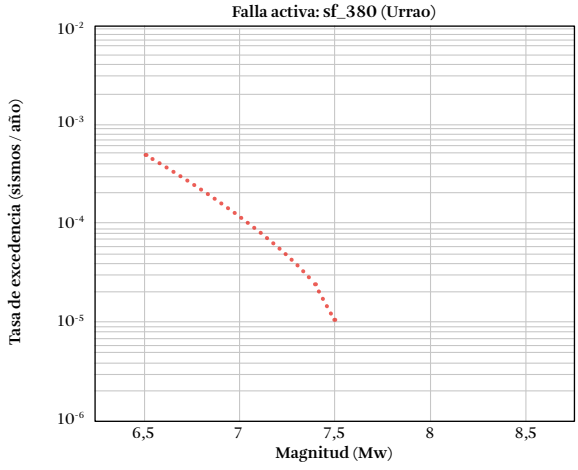



**Figura F.76.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Urrao (sf_380)(sf_379)

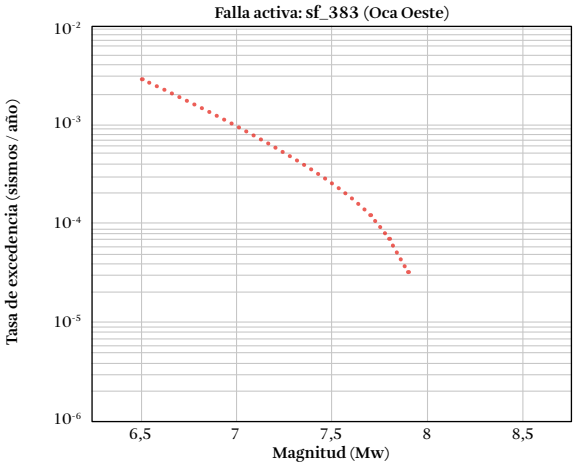



**Figura F.77.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Oca Oeste (sf_383)

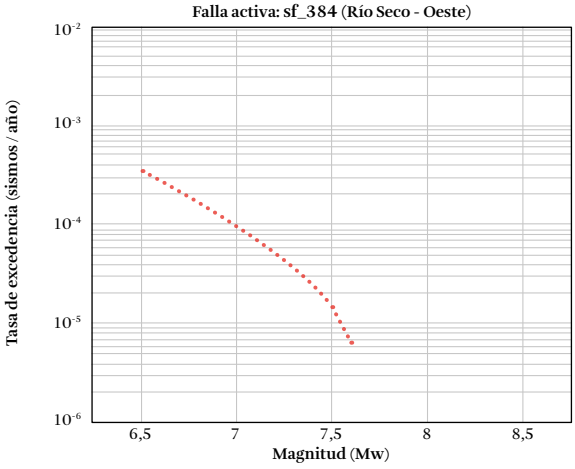



**Figura F.78.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Rio Seco - Oeste (sf_384)

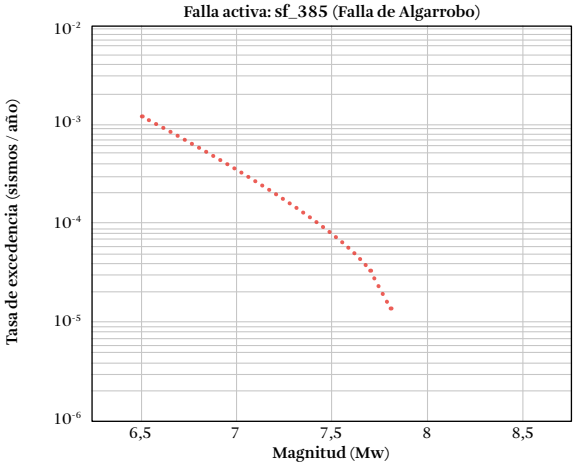



**Figura F.79.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Falla de Algarrobo (sf_385)

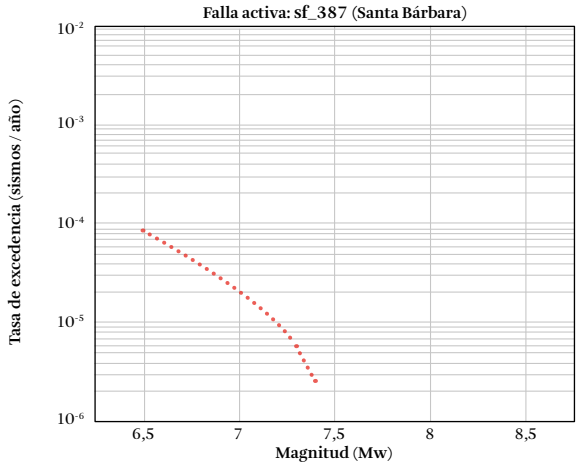



**Figura F.80.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Santa Barbara (sf_387)

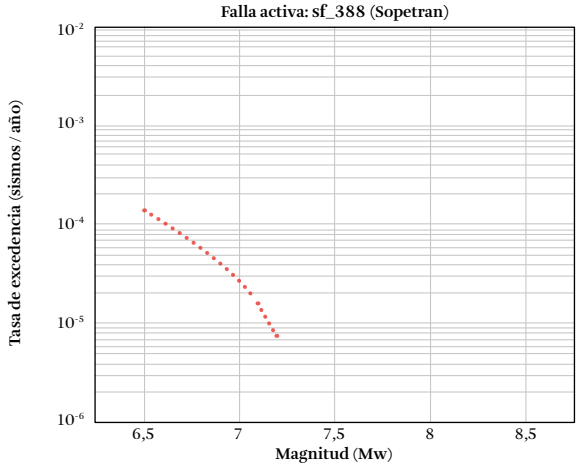



**Figura F.81.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Sopetran (sf_388)

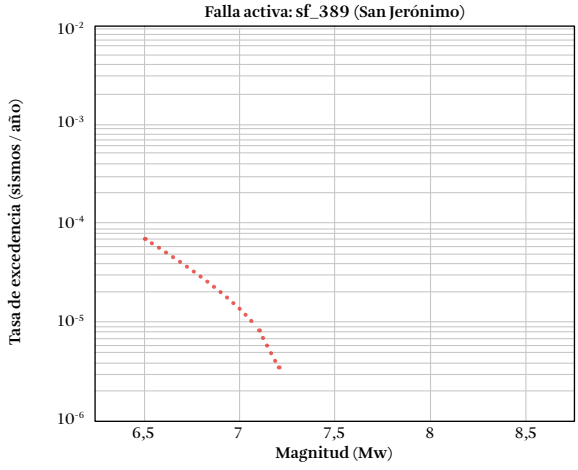



**Figura F.82.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla San Jeronimo (sf_389)

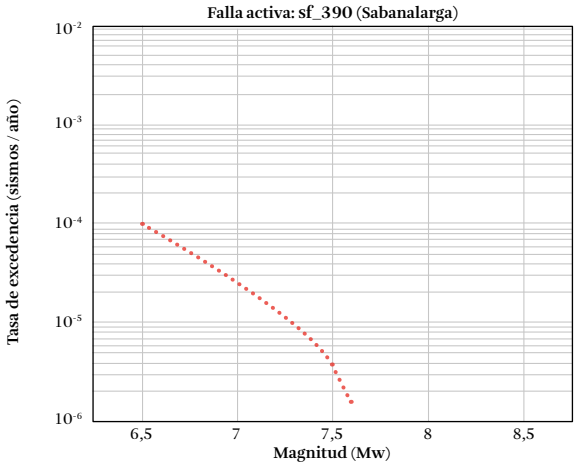



**Figura F.83.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Sabanalarga (sf_390)

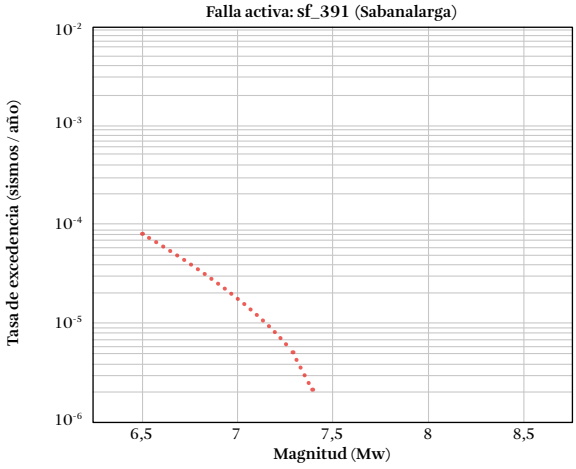



**Figura F.84.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Sabanalarga (sf_391)

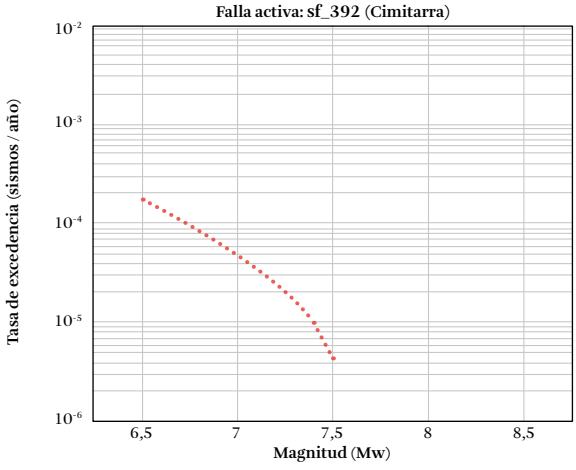



**Figura F.85.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Cimitarra (sf_392)

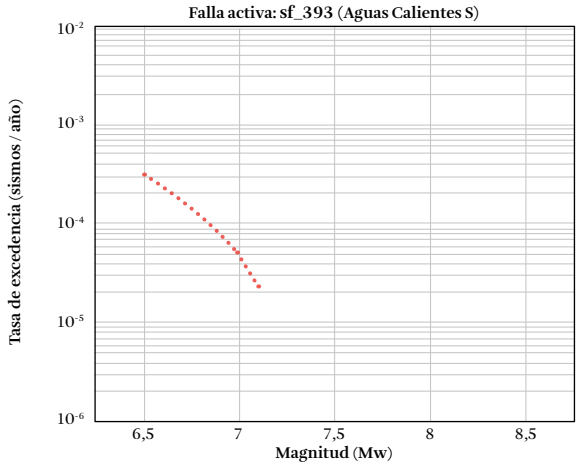



**Figura F.86.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Aguas Calientes S (sf_393)

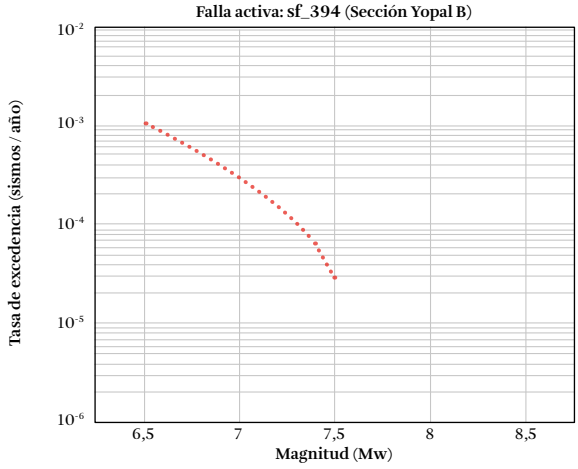



**Figura F.87.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Seccion Yopal B (sf_394)

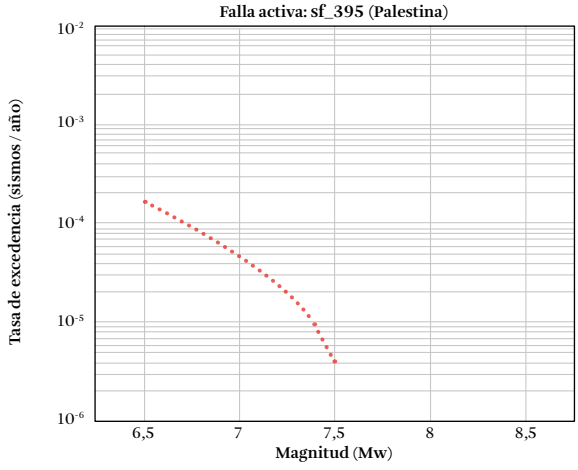



**Figura F.88.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_395)

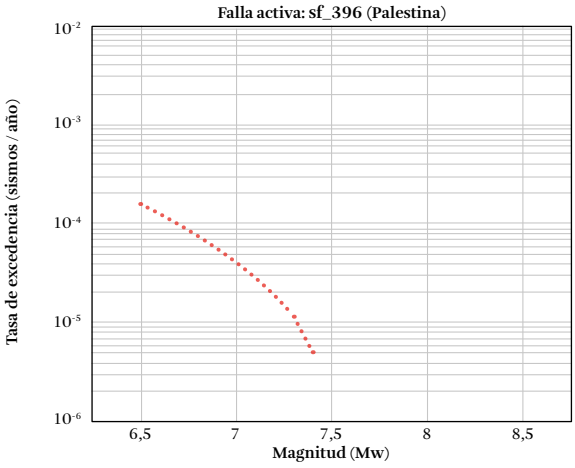



**Figura F.89.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_396)

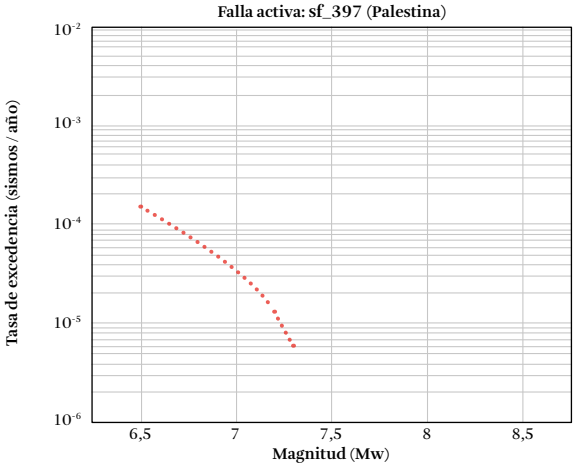



**Figura F.90.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_397)

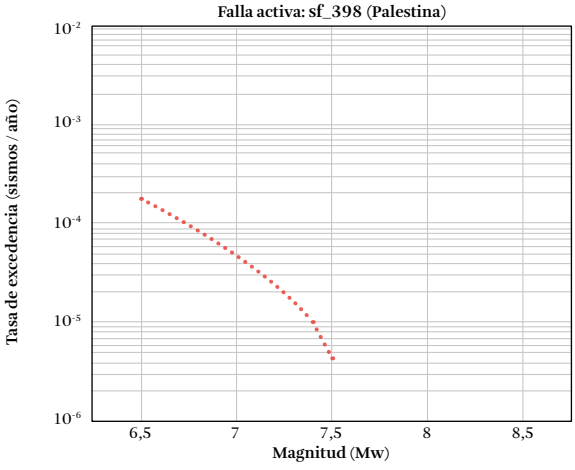



**Figura F.91.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_398)

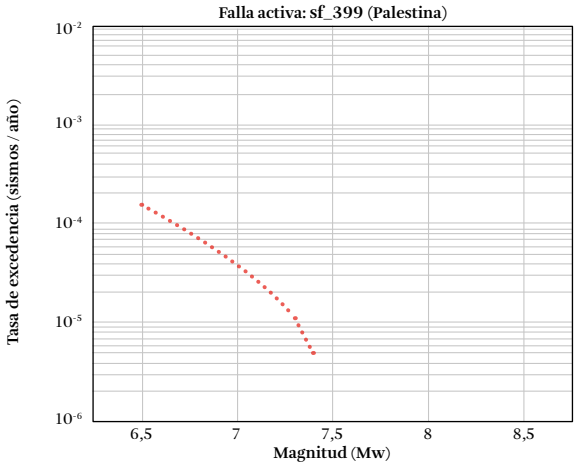



**Figura F.92.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_399)

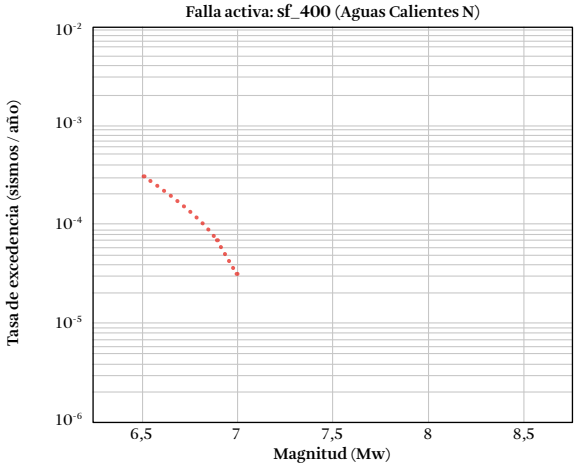



**Figura F.93.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Aguas Calientes N (sf_400)

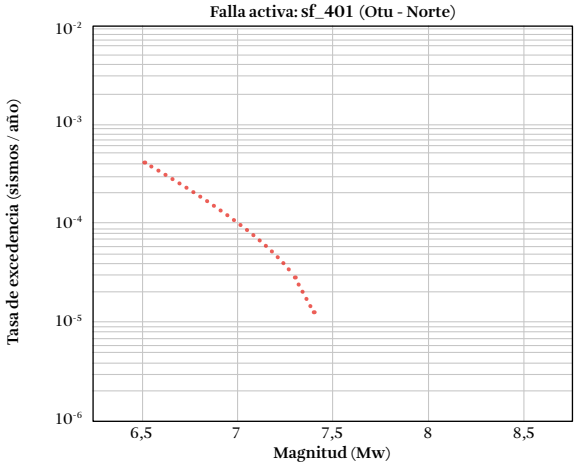



**Figura F.94.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Otu-Norte (sf_401)

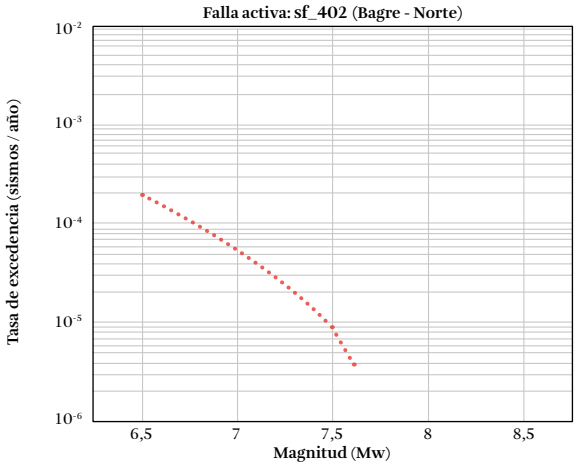



**Figura F.95.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Bagre-Norte (sf_402

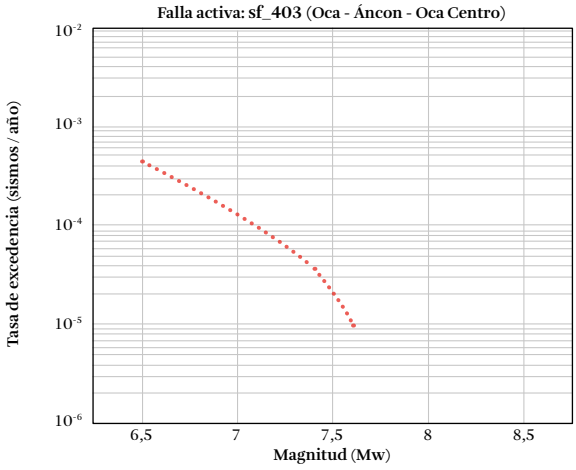



**Figura F.96.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Oca - Ancón - Oca Centro (sf_403)

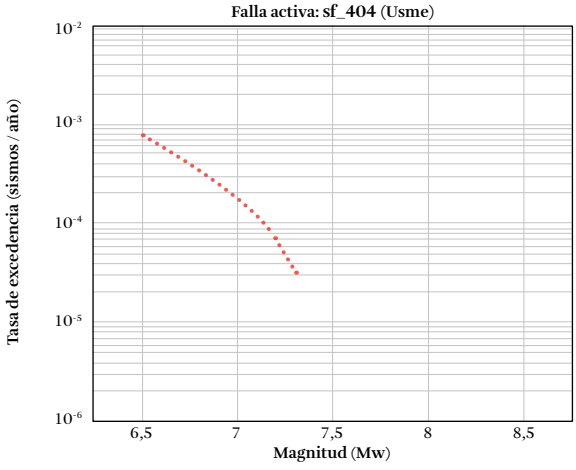



**Figura F.97.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Usme (sf_404)

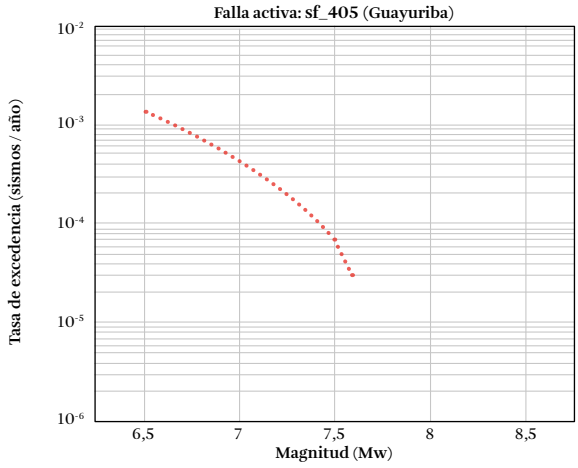



**Figura F.98.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Guayuriba (sf_405)

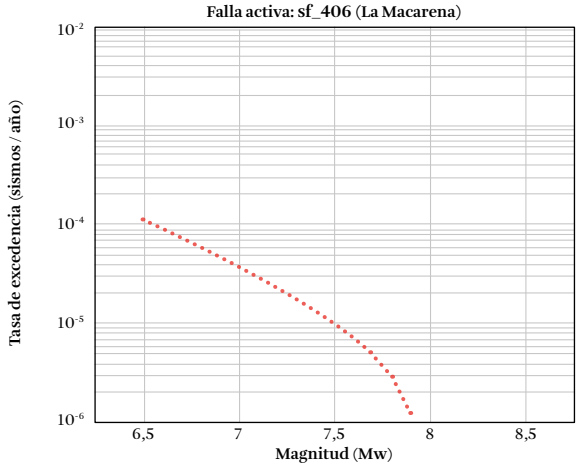



**Figura F.99.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla La Macarena (sf_406)

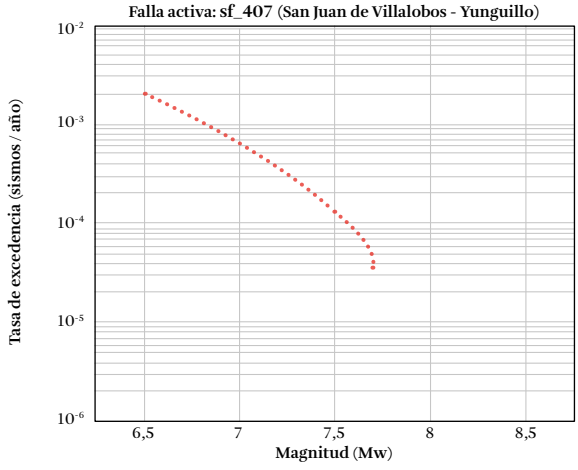



**Figura F.100.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla San Juan de Villalobos-Yunguillo (sf_407)

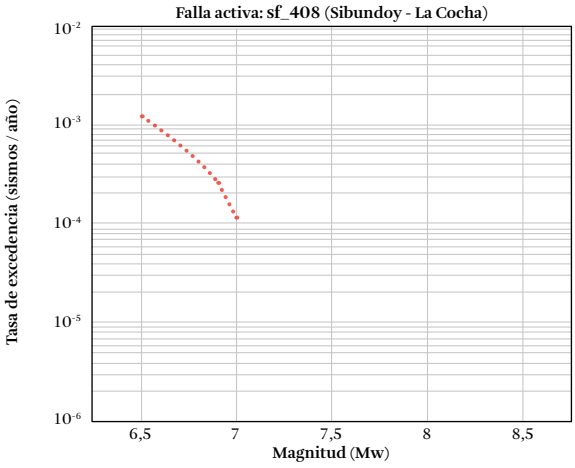



**Figura F.101.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Sibundoy-La Cocha (sf_408)

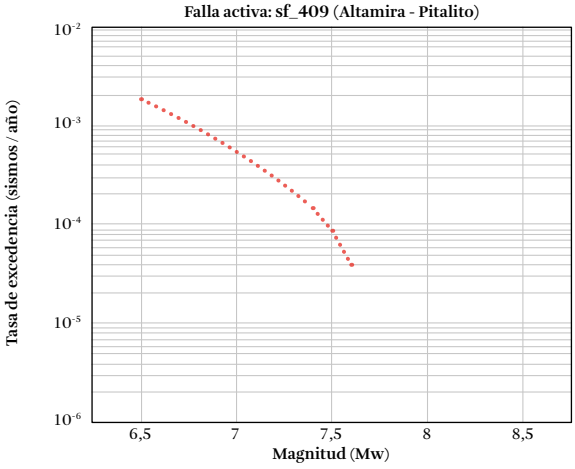



**Figura F.102.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Altamira - Pitalito (sf_409)

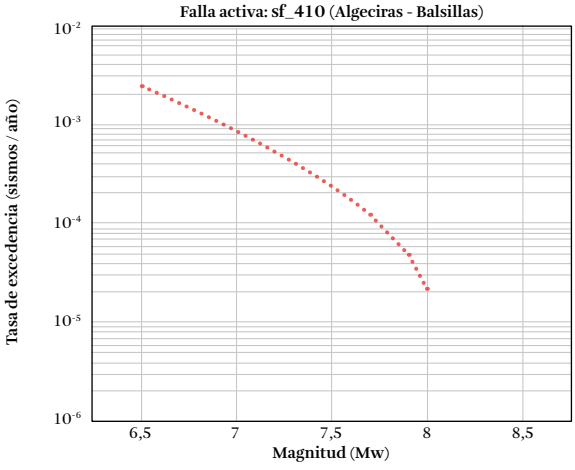



**Figura F.103.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Algeciras-Balsillas (sf_410)

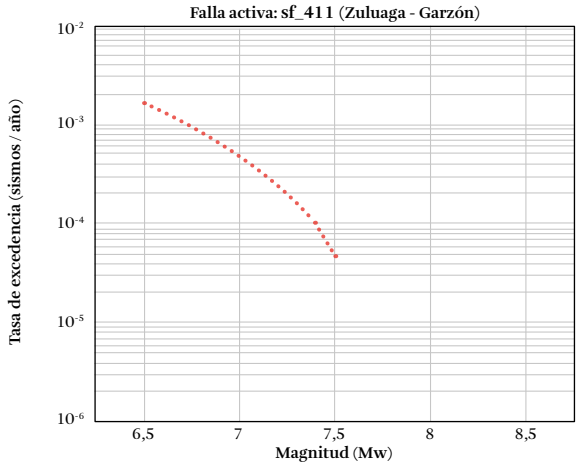



**Figura F.104.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Zuluaga-Garzon (sf_411)

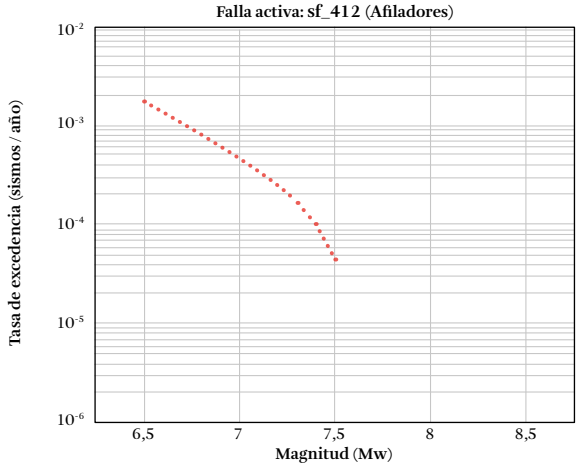



**Figura F.105.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Afiladores (sf_412)

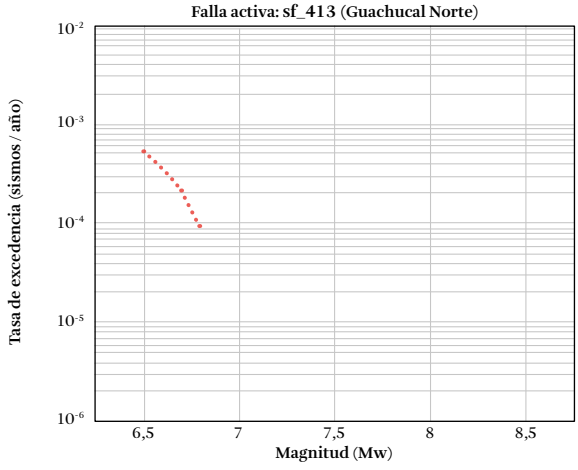



**Figura F.106.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Guachucal Norte (sf_413)

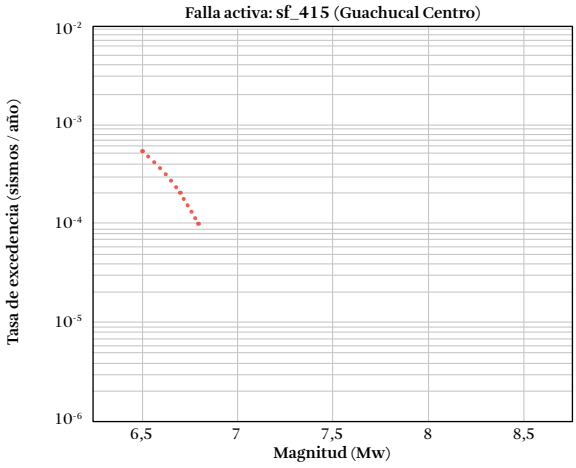



**Figura F.107.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Guachucal Centro (sf_415)

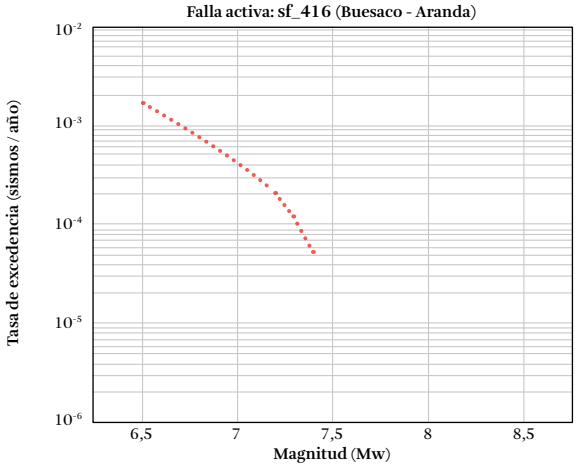



**Figura F.108.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Buesaco-Aranda (sf_416)

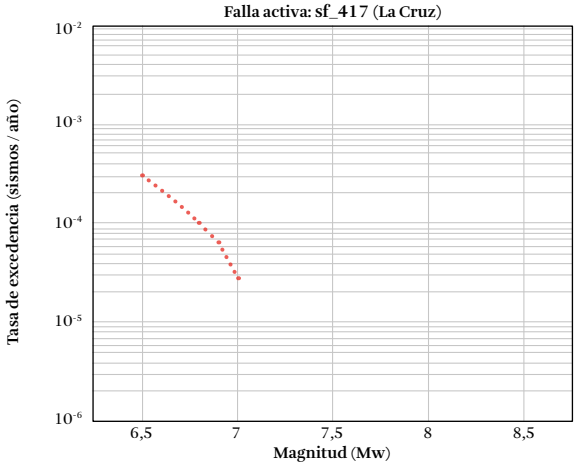



**Figura F.109.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla La Cruz (sf_417)

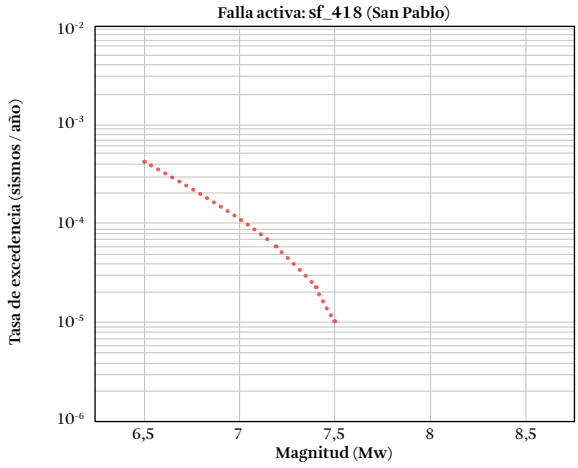



**Figura F.110.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla San Pablo (sf_418)

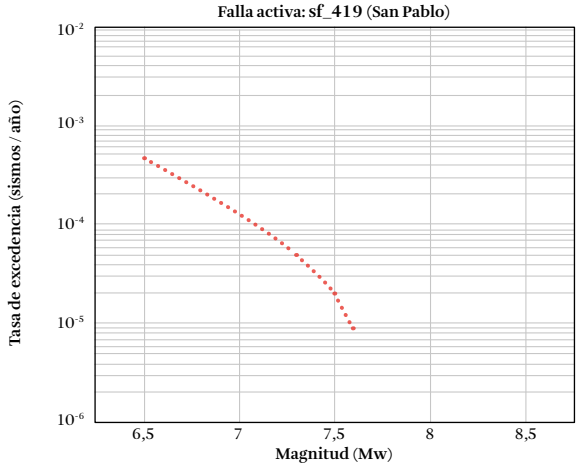



**Figura F.111.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla San Pablo (sf_419)

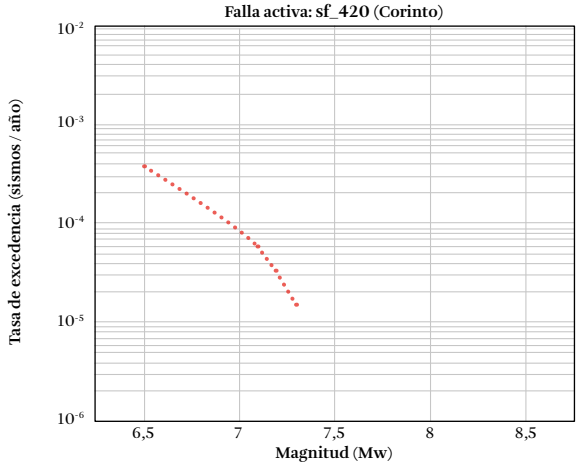



**Figura F.112.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Corinto (sf_420)

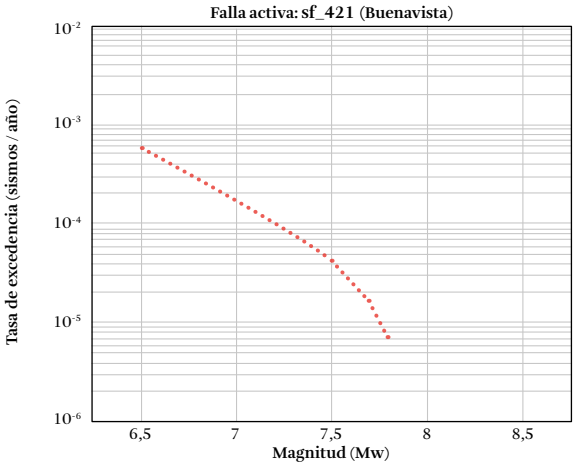



**Figura F.113.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Buenavista (sf_421)

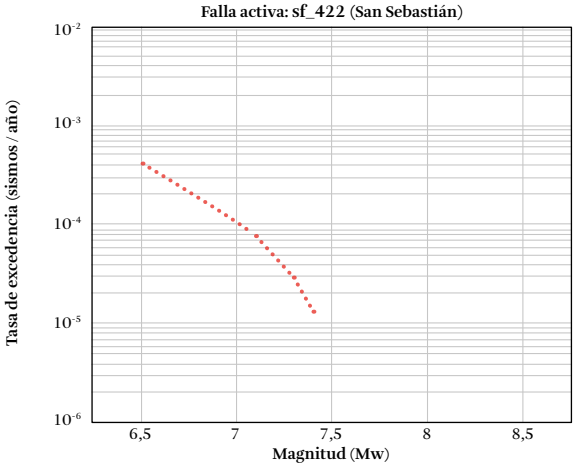



**Figura F.114.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla San Sebastian (sf_422)

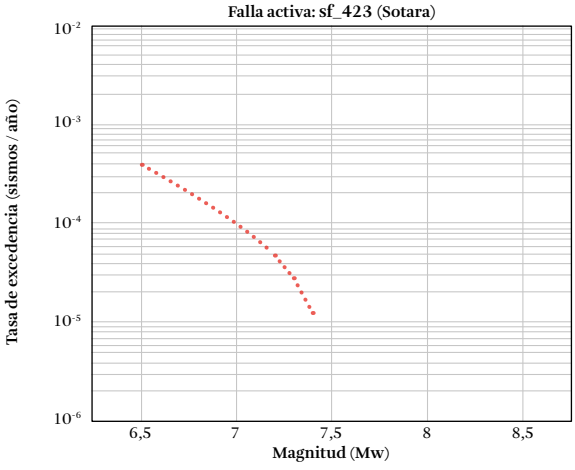



**Figura F.115.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Sotara (sf_423)

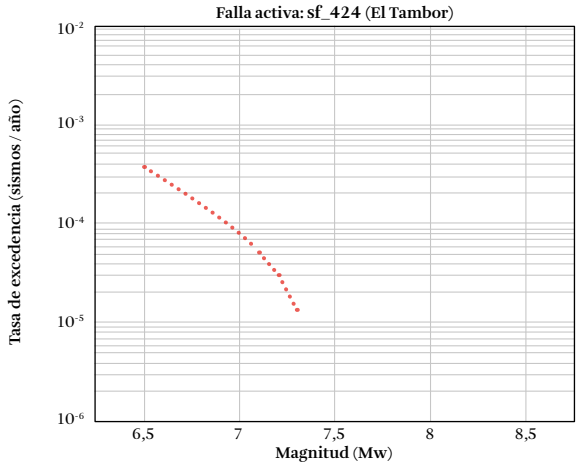



**Figura F.116.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla El Tambor (sf_424)

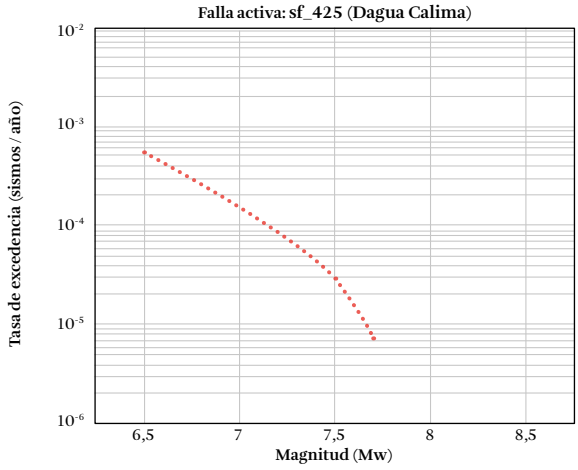



**Figura F.117.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Dagua Calima (sf_425)

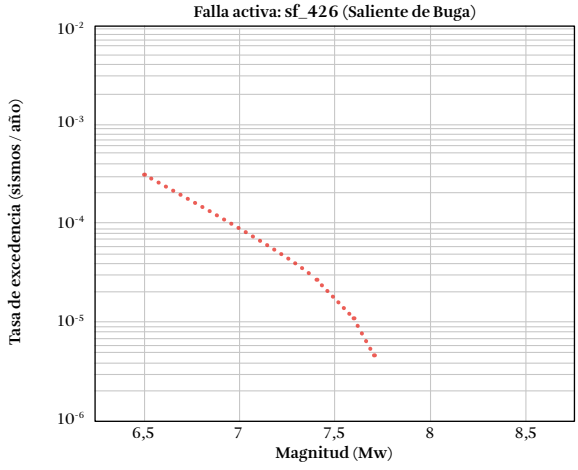



**Figura F.118.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Saliente de Buga (sf_426)

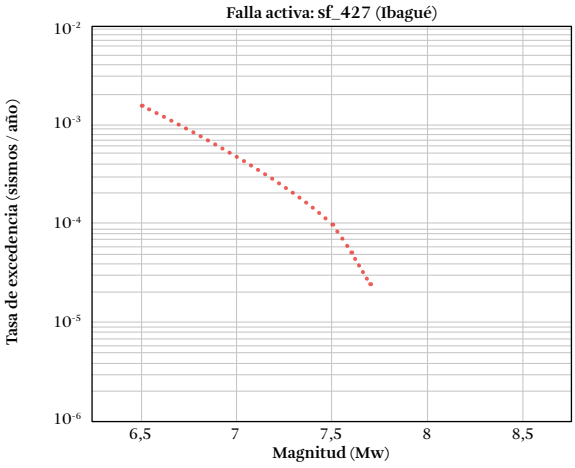



**Figura F.119.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Ibague (sf_427)

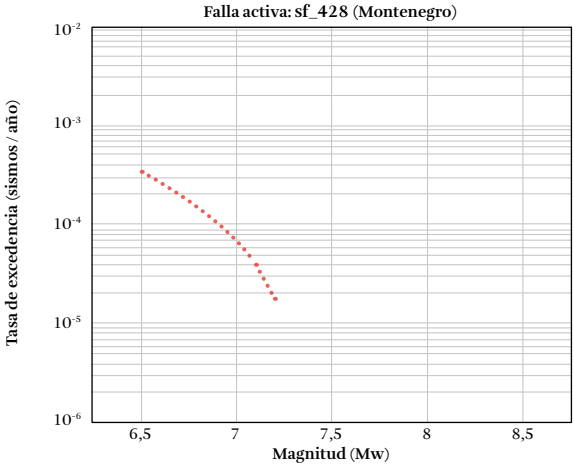



**Figura F.120.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Montenegro (sf_428)

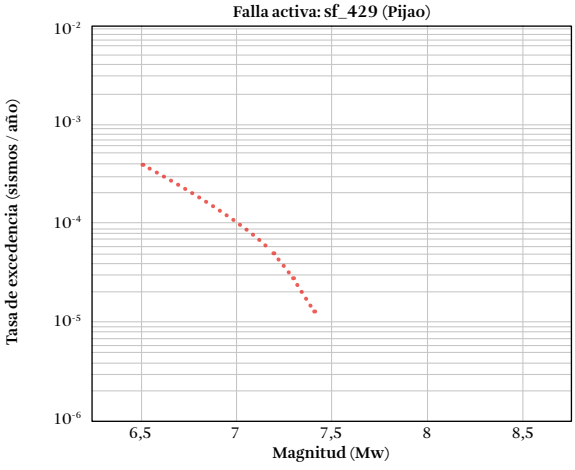



**Figura F.121.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Pijao (sf_429)

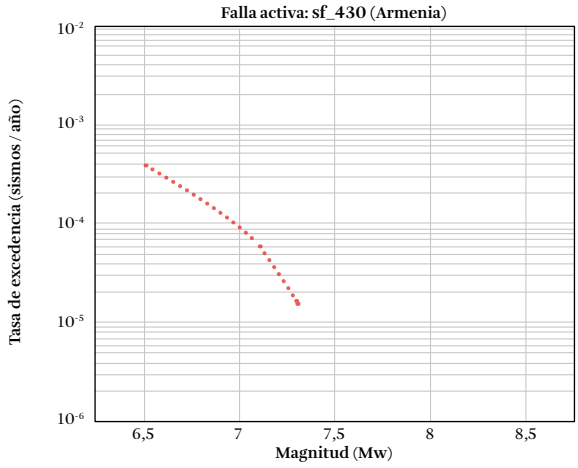



**Figura F.122.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Armenia (sf_430)

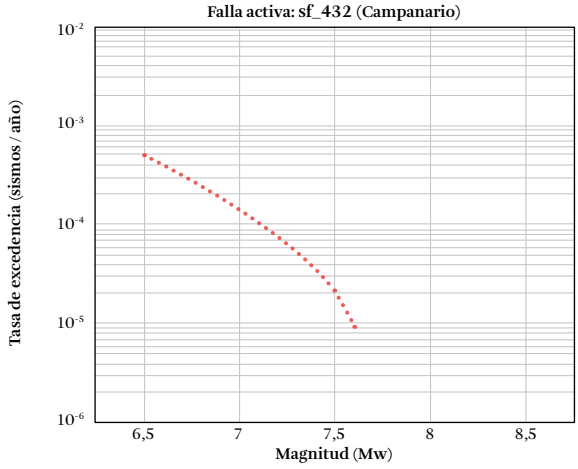



**Figura F.123.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Campanario (sf_432)

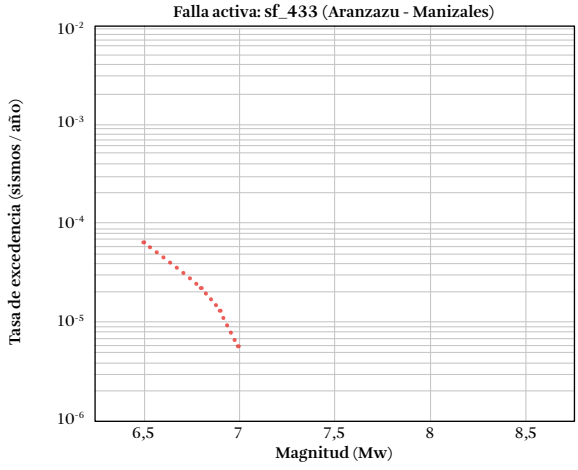



**Figura F.124.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Aranzazu-Manizales (sf_433)

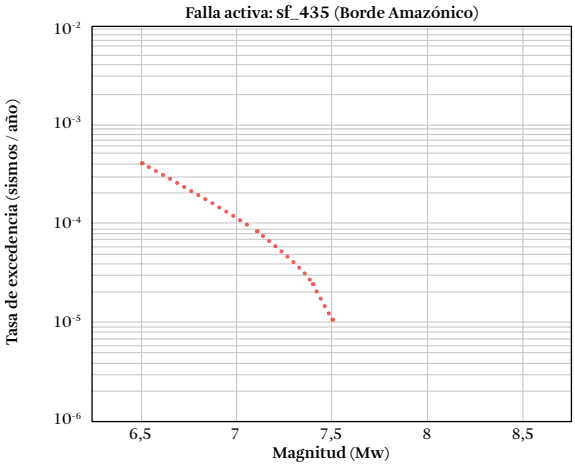



**Figura F.125.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Borde Amazónico (sf_435)

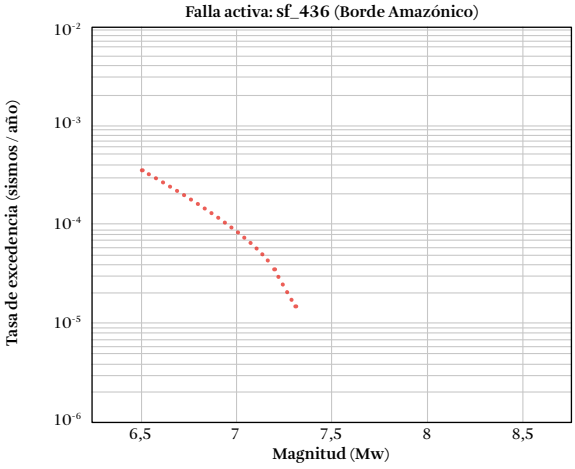



**Figura F.126.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Borde Amazónico (sf_436)

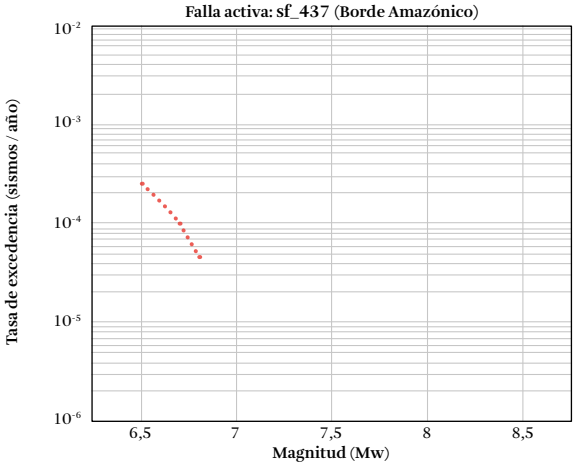



**Figura F.127.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Borde Amazónico (sf_437)

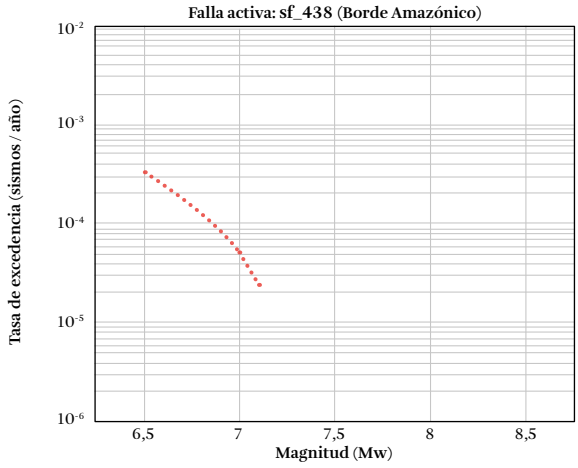



**Figura F.128.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Borde Amazónico (sf_438)

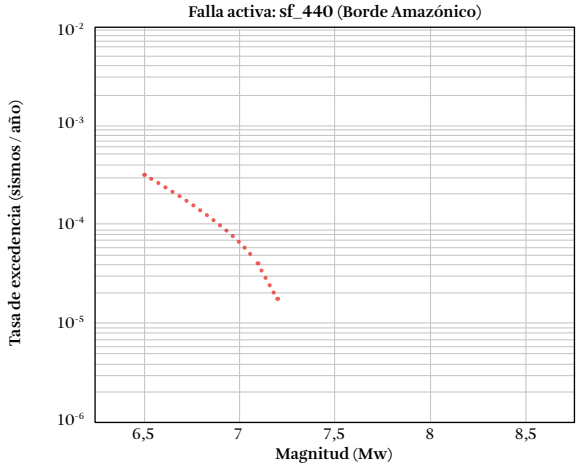



**Figura F.129.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Borde Amazónico (sf_440)

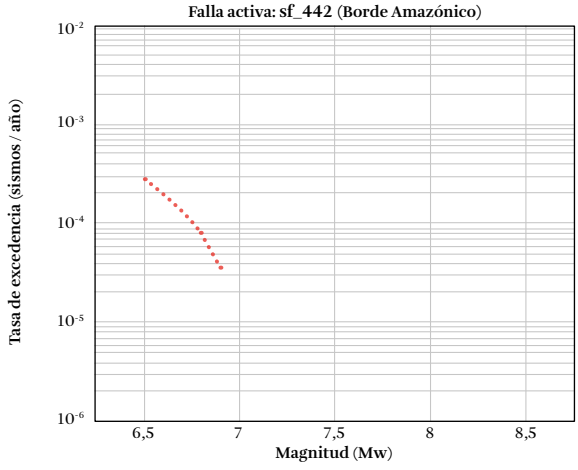



**Figura F.130.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Borde Amazónico (sf_442)

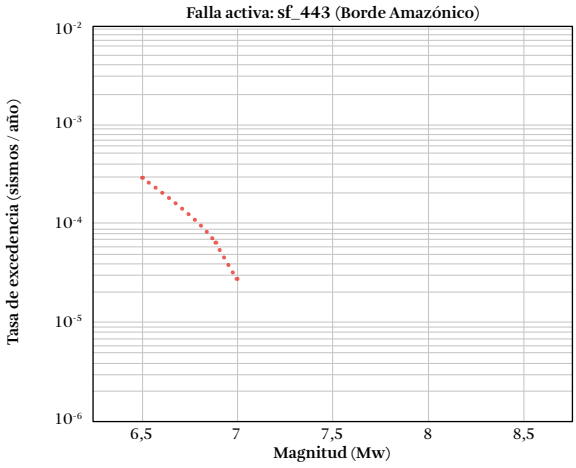



**Figura F.131.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Borde Amazónico (sf_443)

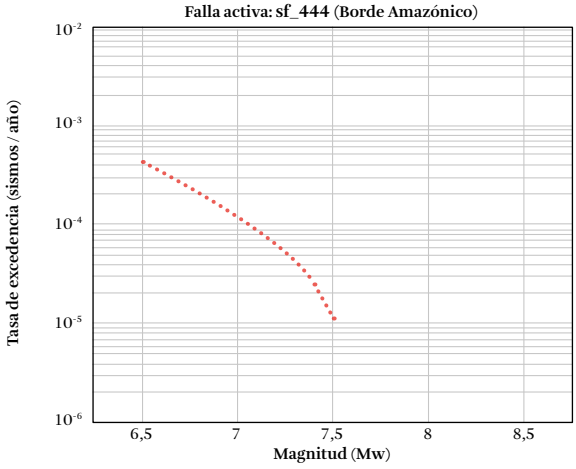



**Figura F.132.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Borde Amazónico (sf_444)

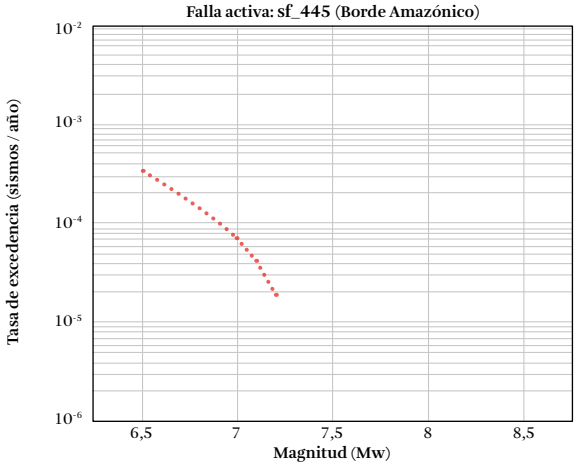



**Figura F.133.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Borde Amazónico (sf_445)

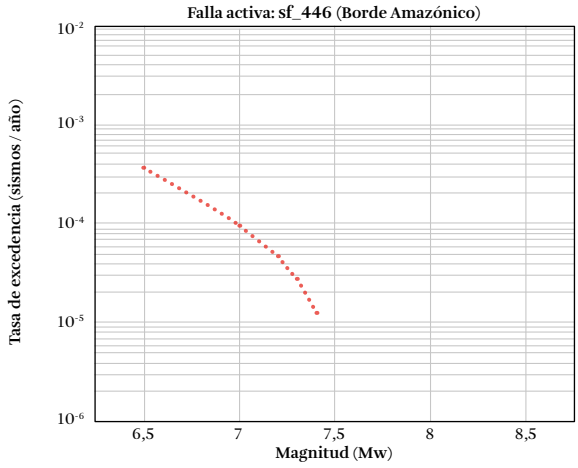



**Figura F.134.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Borde Amazónico (sf_446)

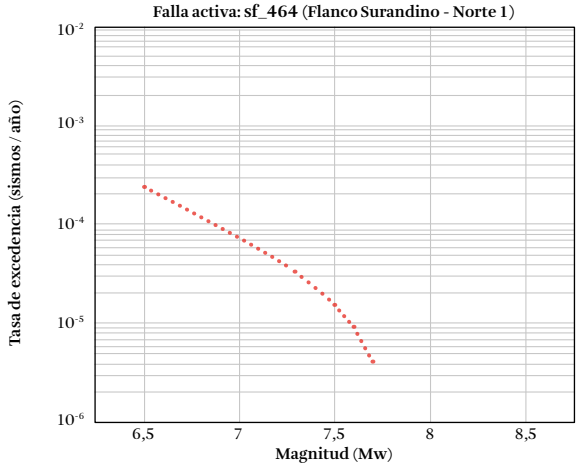



**Figura F.135.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Surandino - Norte 1 (sf_464)

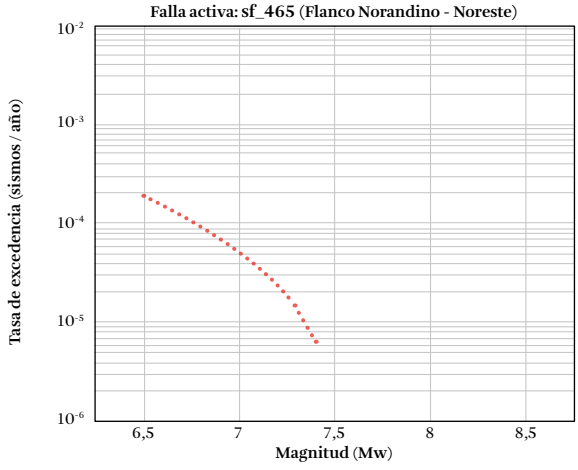



**Figura F.136.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Norandino - Noreste (sf_465)

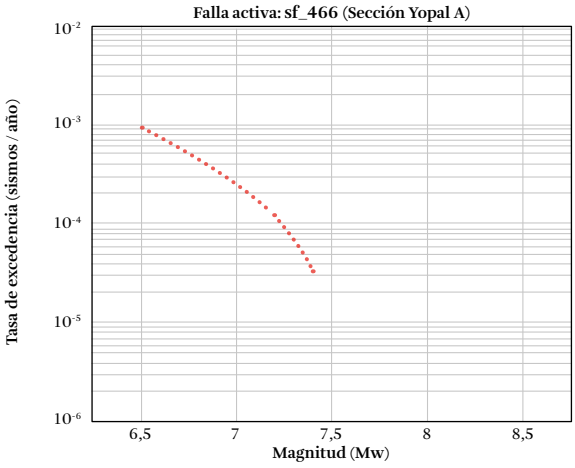



**Figura F.137.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Sección Yopal A (sf_466)

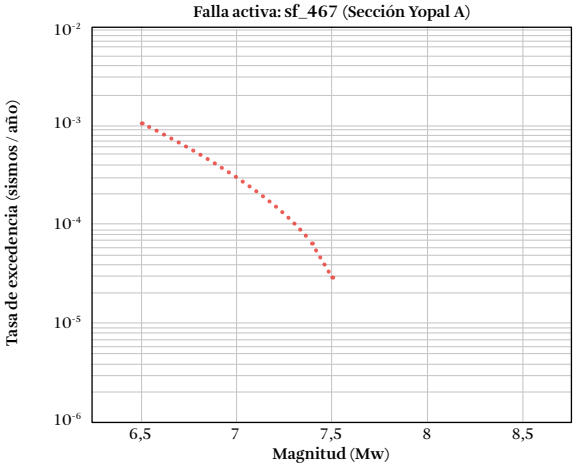



**Figura F.138.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Sección Yopal A (sf_467)

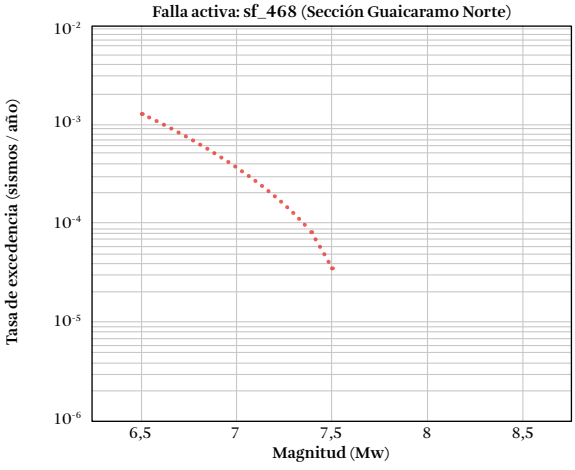



**Figura F.139.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Seccion Guaicaramo Norte (sf_468)

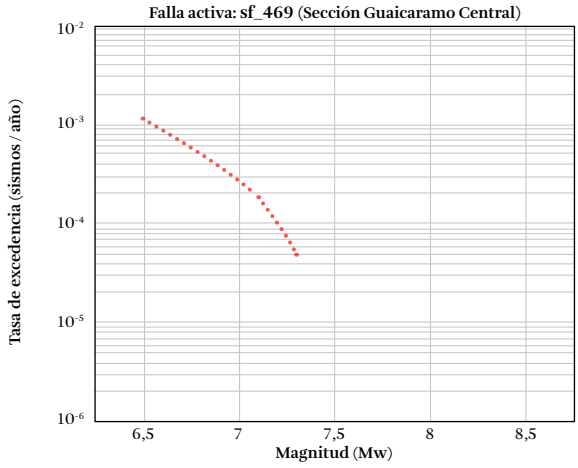



**Figura F.140.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Seccion Guaicaramo Central (sf_469)

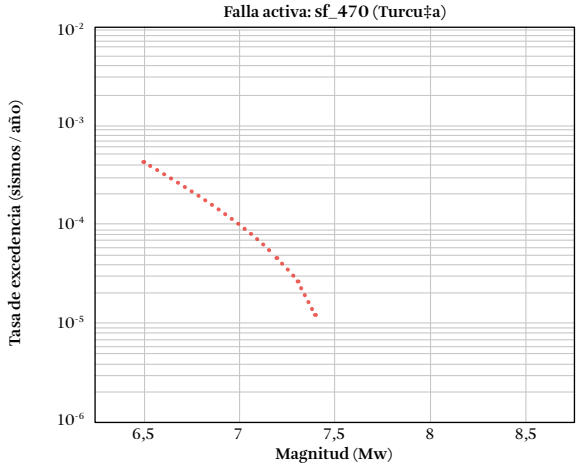



**Figura F.141.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Tucur‡a (sf_470)

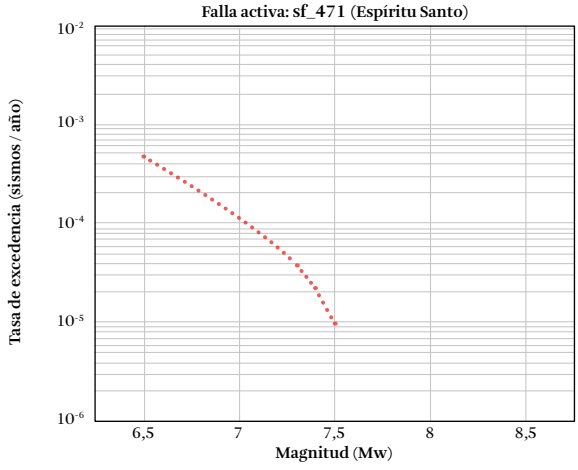



**Figura F.142.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Espíritu Santo (sf_471)

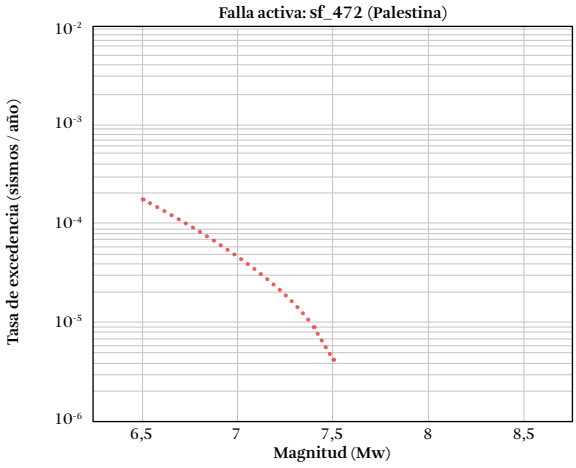



**Figura F.143.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_472)

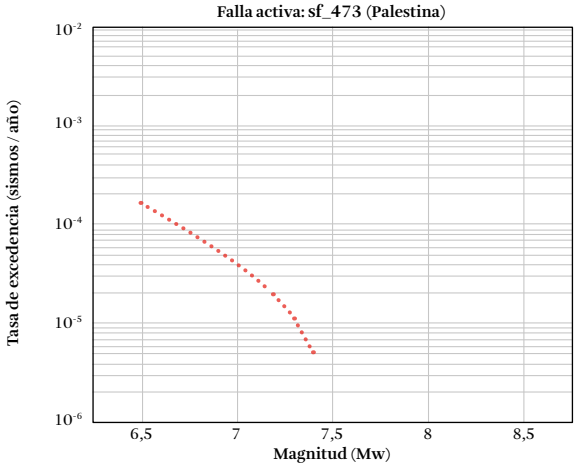



**Figura F.144.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_473)

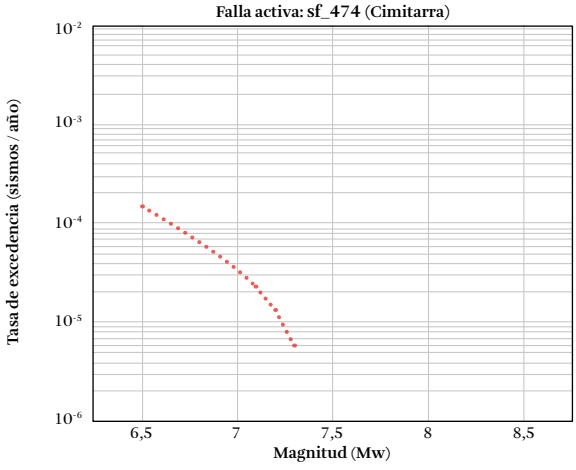



**Figura F.145.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Cimitarra (sf_474)

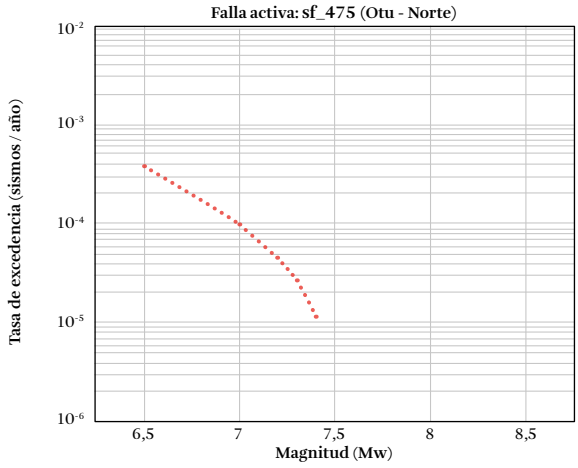



**Figura F.146.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Otu-Norte (sf_475)

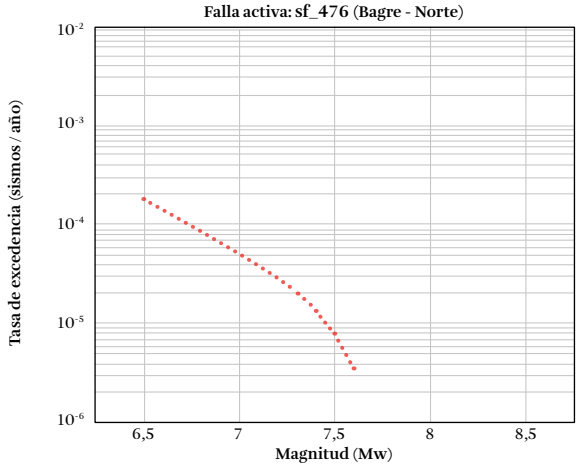



**Figura F.147.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Bagre-Norte (sf_476)

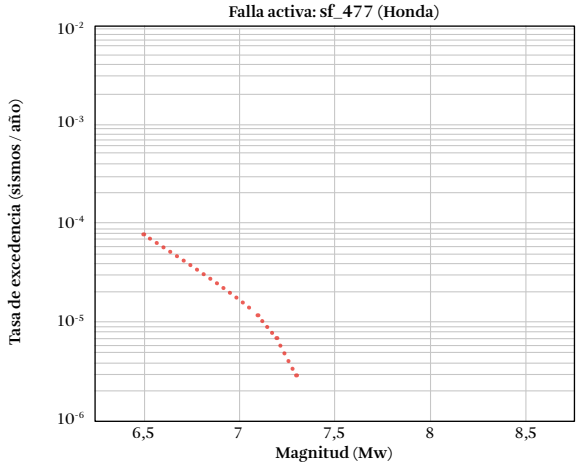



**Figura F.148.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Honda (sf_477)

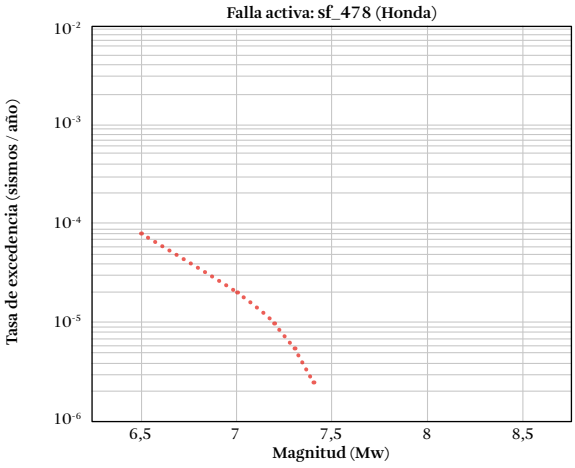



**Figura F.149.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Honda (sf_478)

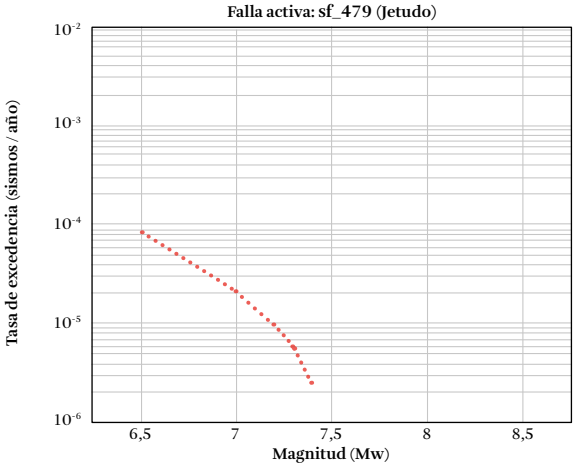



**Figura F.150.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Jetudo (sf_479)

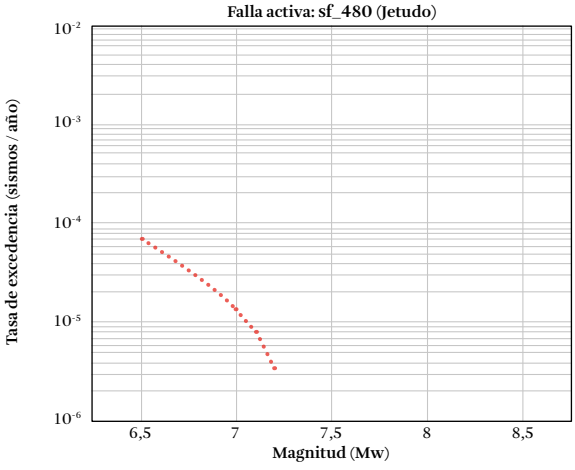



**Figura F.151.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Jetudo (sf_480)

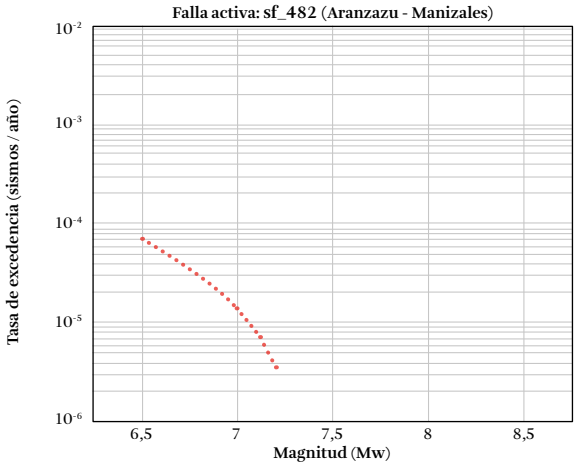



**Figura F.152.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Aranzazu-Manizales (sf_482)

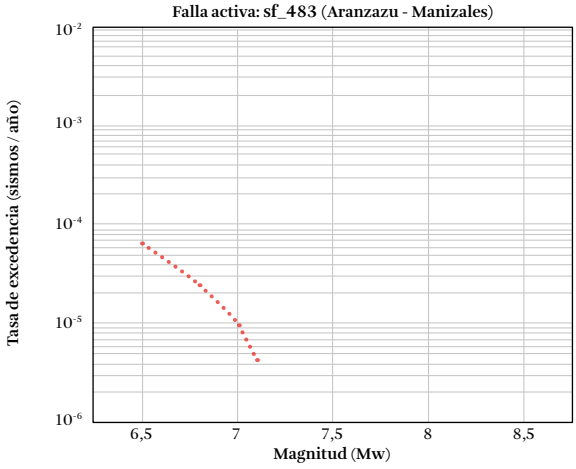



**Figura F.153.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Aranzazu-Manizales (sf_483)

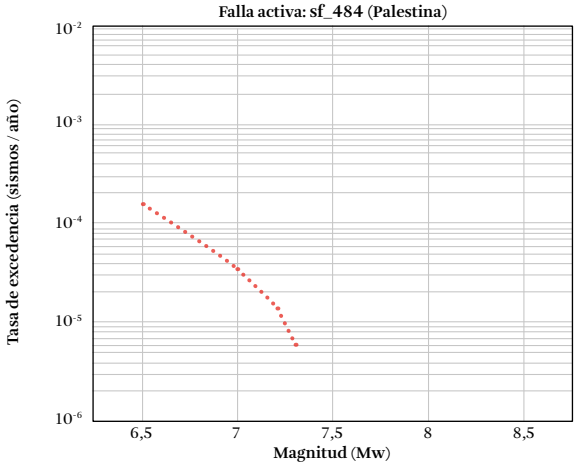



**Figura F.154.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_484)

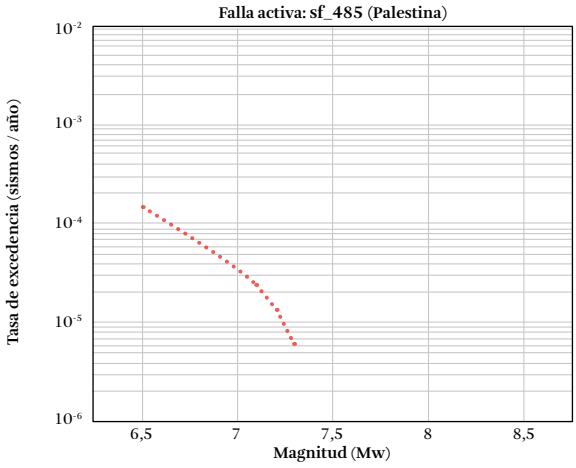



**Figura F.155.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_485)

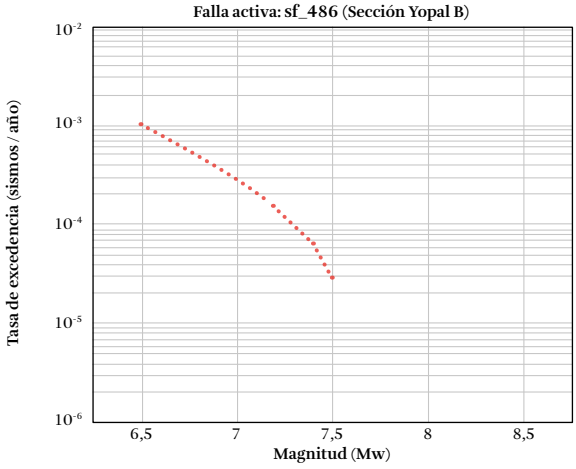



**Figura F.156.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Sección Yopal B (sf_486)

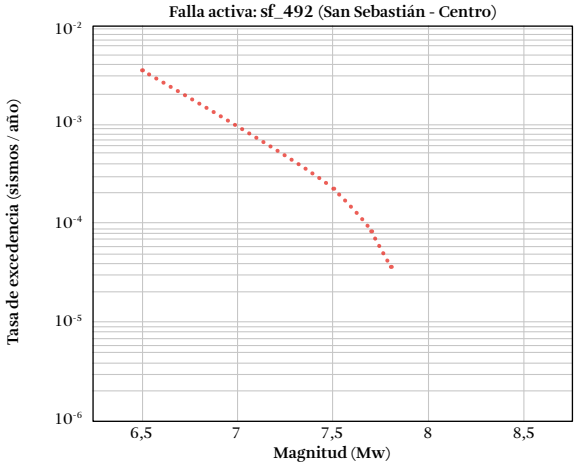



**Figura F.157.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla San Sebastián - Centro (sf_492)

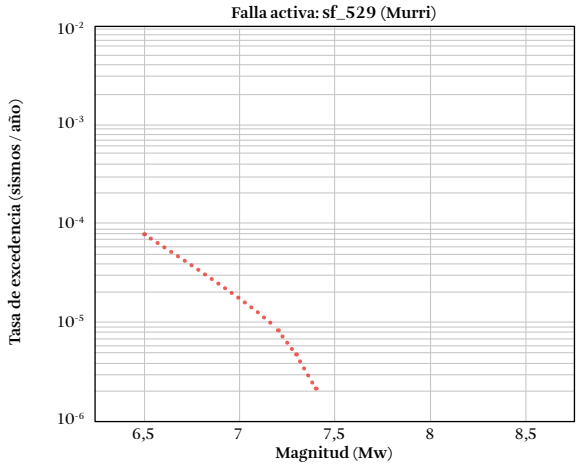



**Figura F.158.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Murri (sf_529)

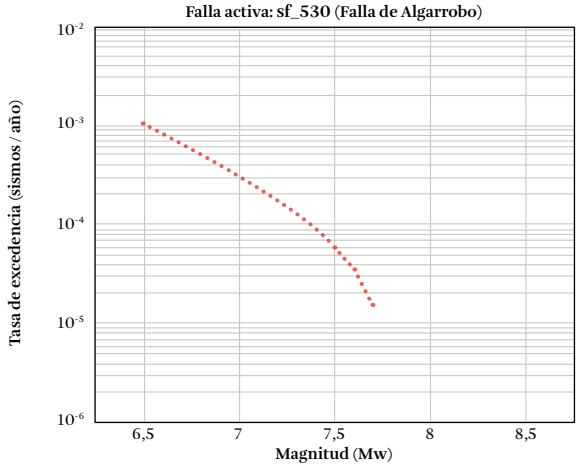



**Figura F.159.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Falla de Algarrobo (sf_530)

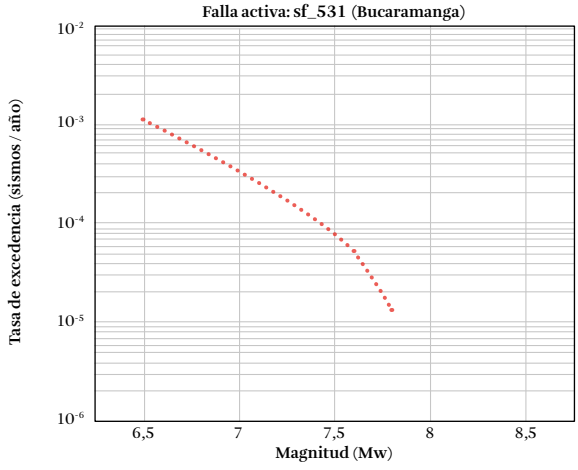



**Figura F.160.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Bucaramanga (sf_531)

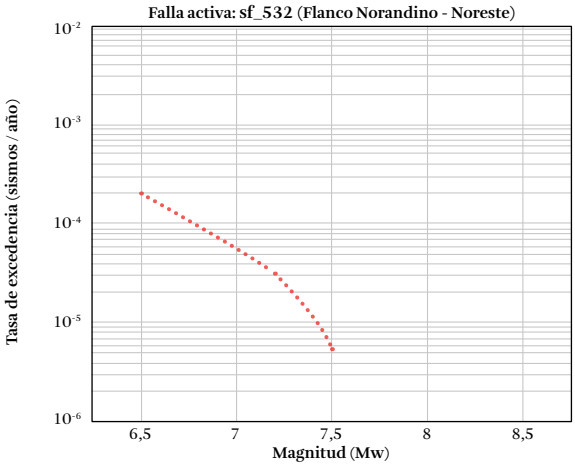



**Figura F.161.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Norandino - Noreste (sf_532)

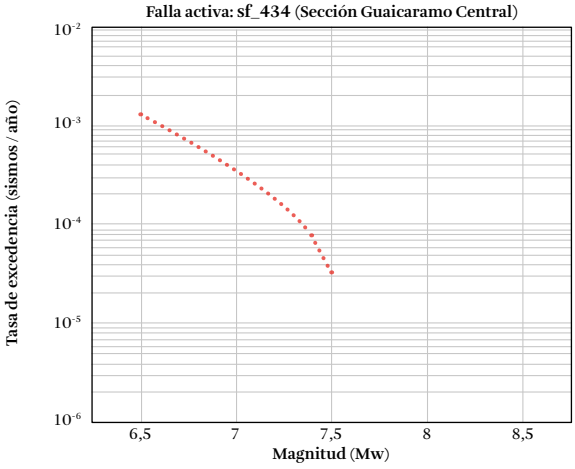



**Figura F.162.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Sección Guaicaramo Central (sf_534)

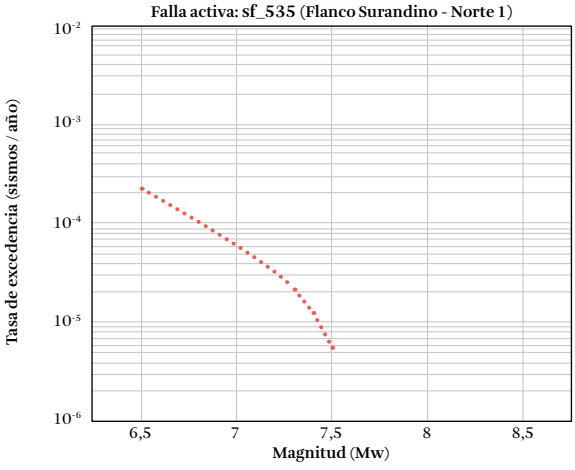



**Figura F.163.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Surandino - Norte 1 (sf_535)

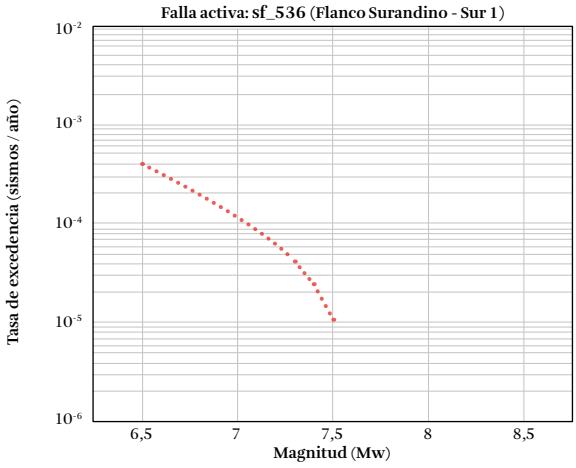



**Figura F.164.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Surandino - Sur 1 (sf_536)

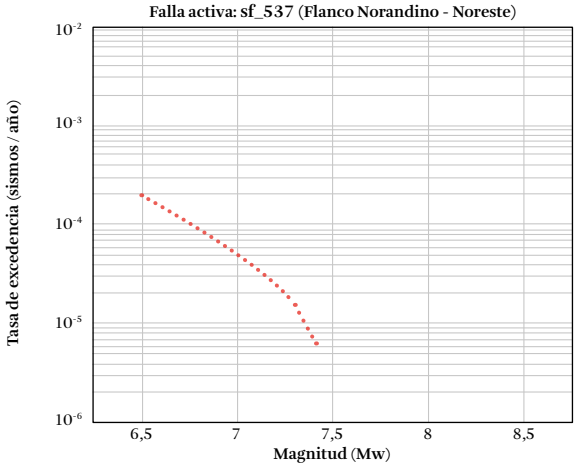



**Figura F.165.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Norandino - Noreste (sf_537)

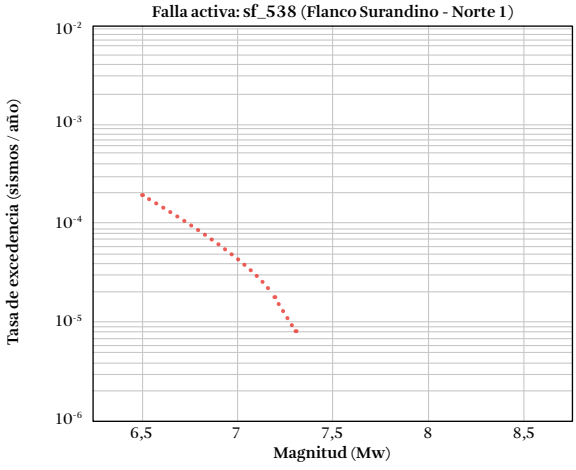



**Figura F.166.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Flanco Surandino - Norte 1 (sf_538)

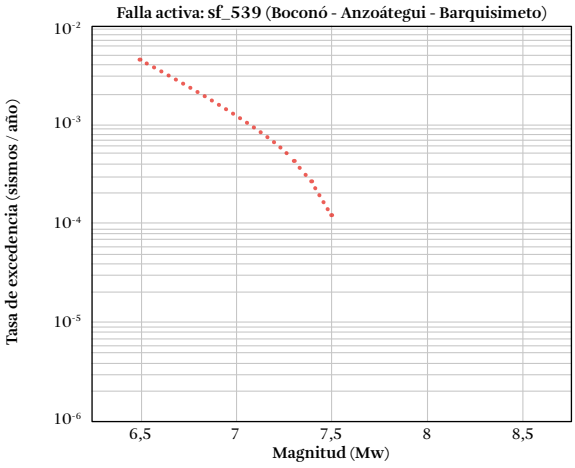



**Figura F.167.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Boconó - Anzoátegui - Barquisimeto (sf_539)

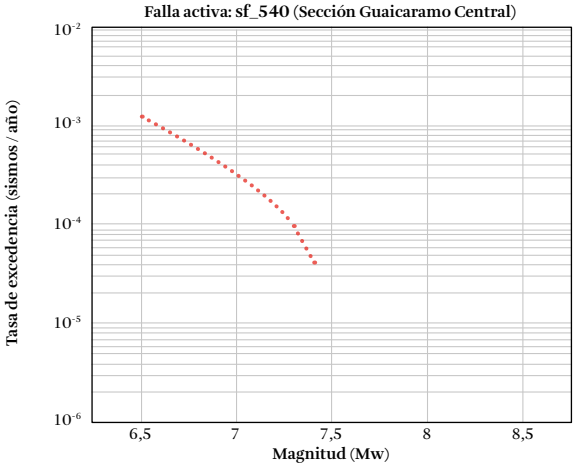



**Figura F.168.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Seccion Guaicaramo Central (sf_540)

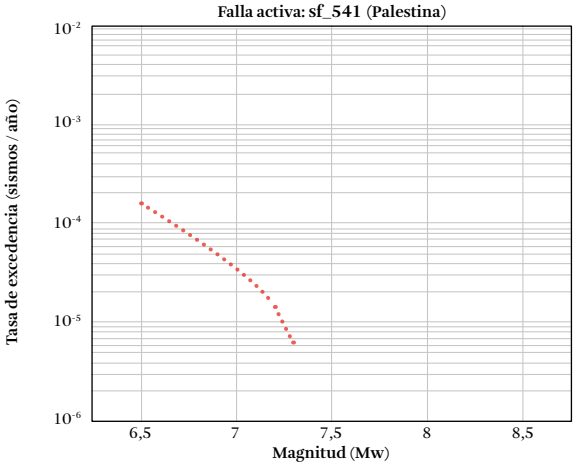



**Figura F.169.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_541)

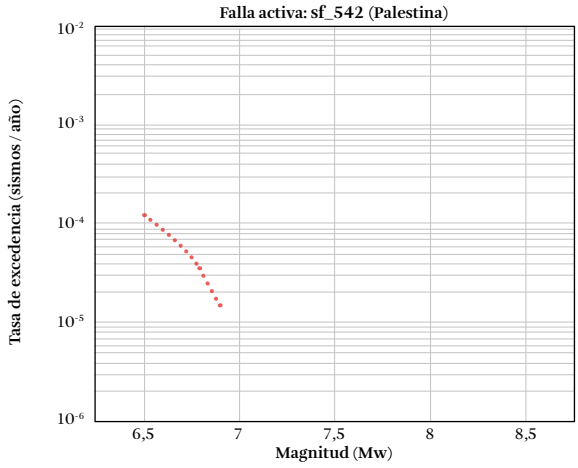



**Figura F.170.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Palestina (sf_542)

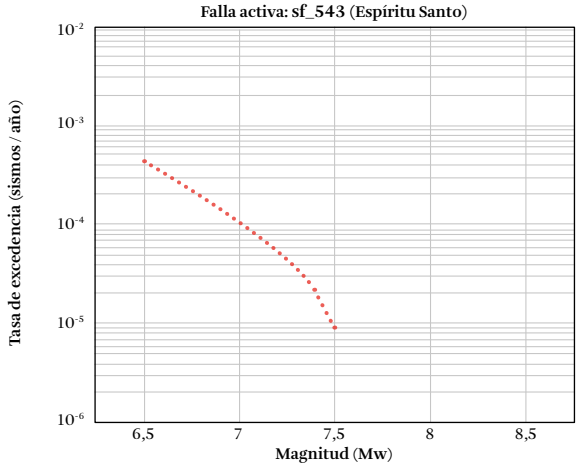



**Figura F.171.** Distribución de magnitud y frecuencia, falla Espíritu Santo (sf_543)

# G

# Distribuciones de magnitud-frecuencia en fuentes interplaca (subducción), Benioff y nido sísmico de Bucaramanga

En este anexo se presentan, para cada fuente, las distribuciones de magnitud - frecuencia obtenidas.

### Fuentes interplaca

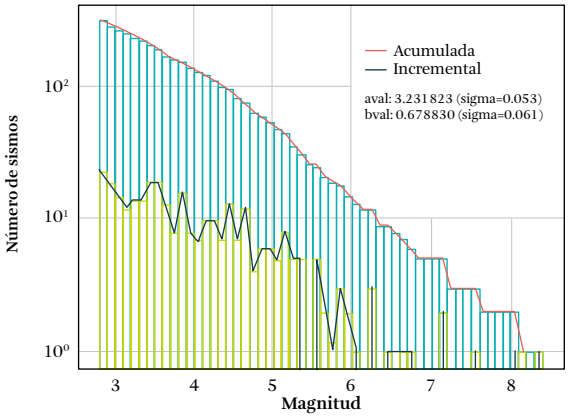



**Figura G.7.** Distribución de magnitud - frecuencia; fuente interplaca Colombia - no segmentado (fig_mfd_int_col.png)

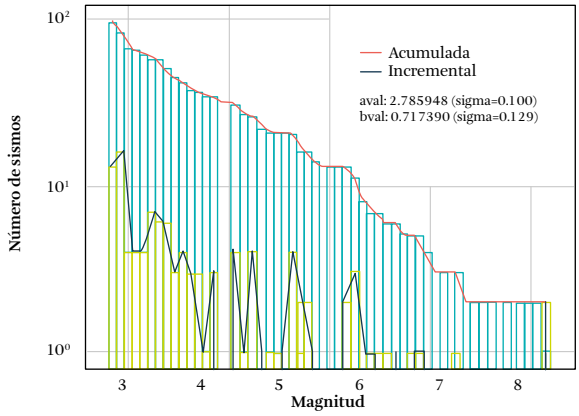



**Figura G.2.** Distribución de magnitud - frecuencia; fuente interplaca - segmento 1 (fig_mfd_int_col1.png)

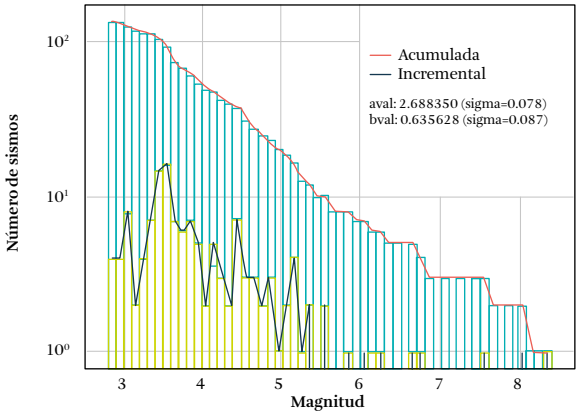



**Figura G.1.** Distribución de magnitud - frecuencia; fuente interplaca - segmento 0 (fig_mfd_int_col0.png)

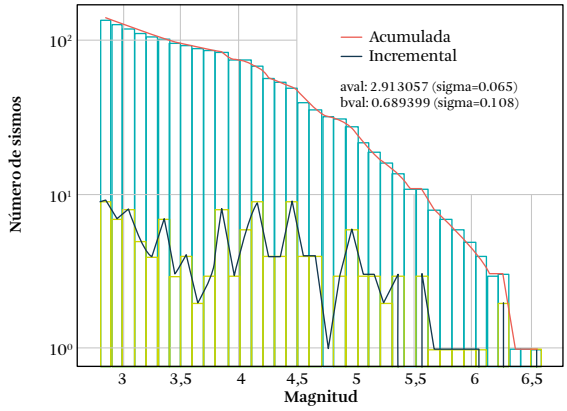



**Figura G.3.** Distribución de magnitud - frecuencia; fuente interplaca - segmento 2' (fig_mfd_int_col2.png)

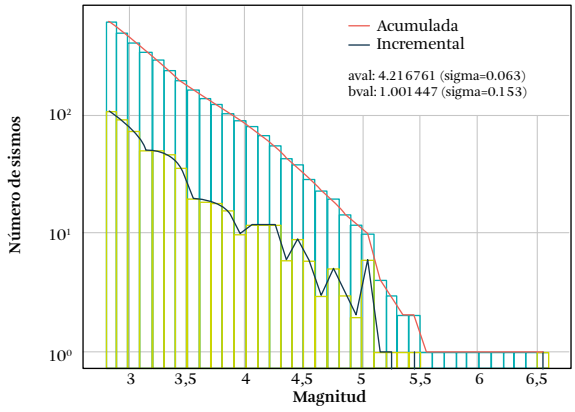



**Figura G.4.** Distribución de magnitud - frecuencia; fuente nido sísmico de Bucaramanga segmento 0 (fig_mfd_slab_buc0.png)

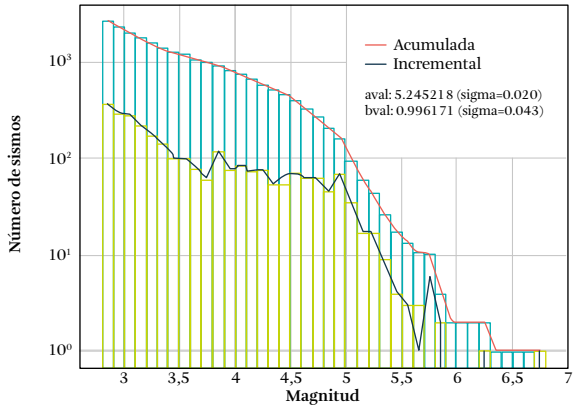



**Figura G.5.** Distribución de magnitud - frecuencia; fuente nido sísmico de Bucaramanga segmento 1 (fig_mfd_slab_buc1.png)

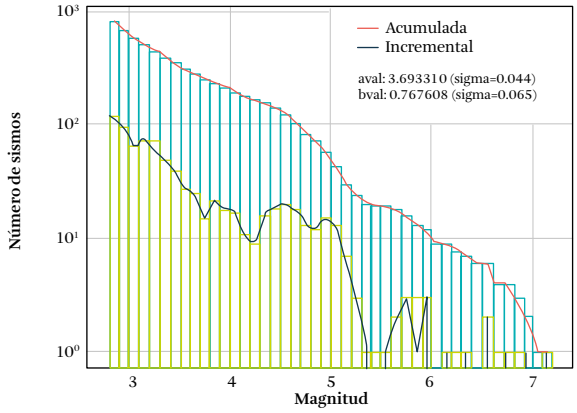



**Figura G.6.** Distribución de magnitud - frecuencia; fuente Benioff-40km (fig_mfd_slab_col40.png)

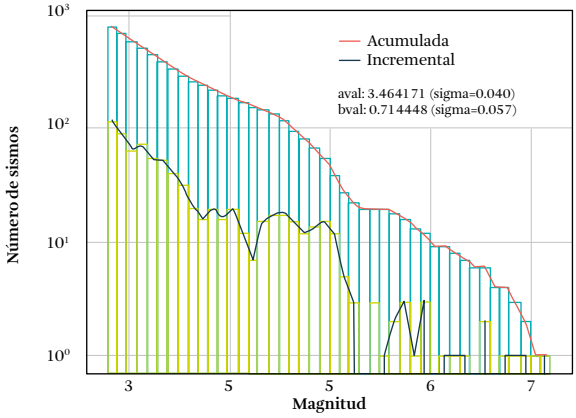
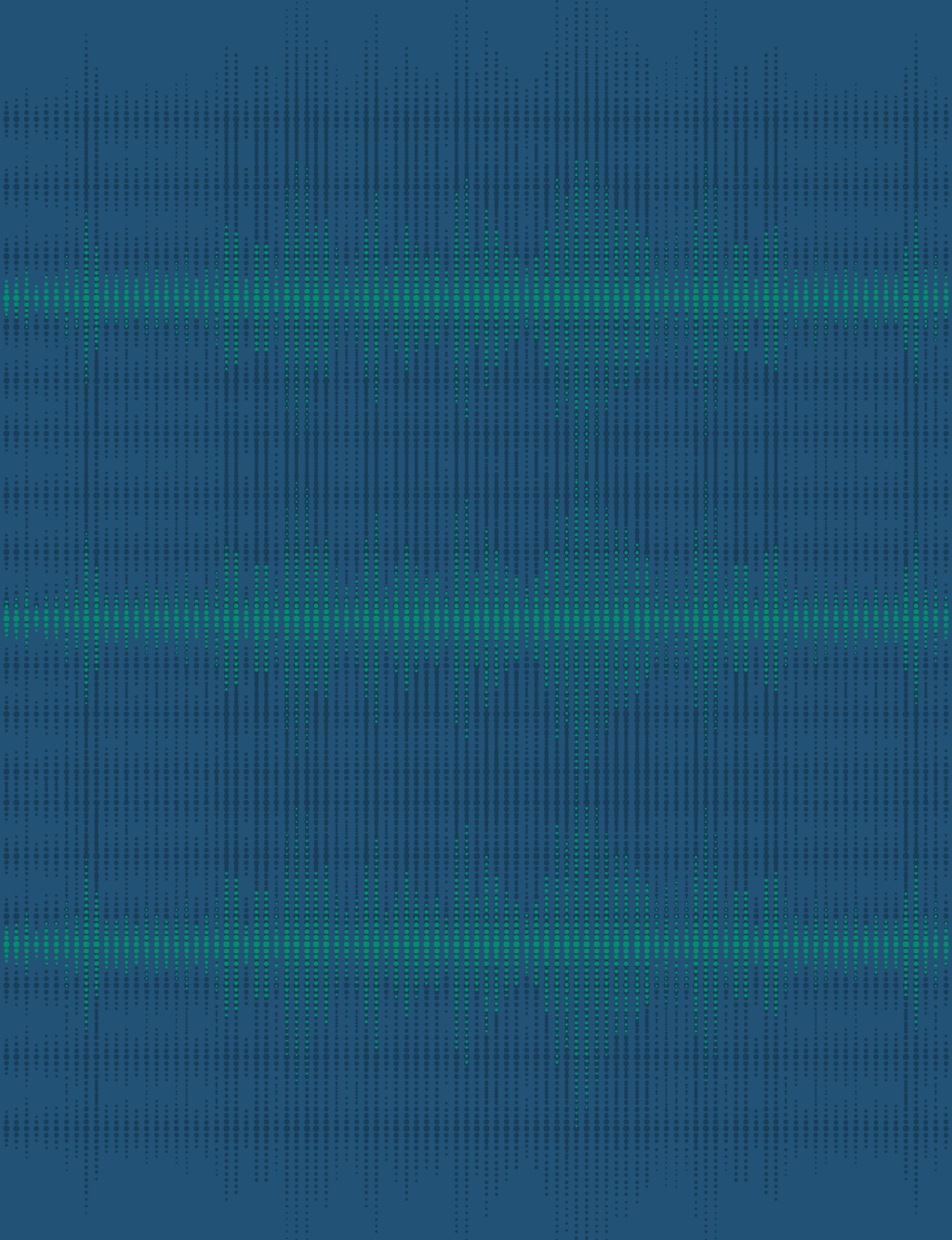



**Figura G.8.** Distribución de magnitud - frecuencia; fuente Benioff-50km - no segmentado' (fig_mfd_slab_col50.png)



H

# Metodologías utilizadas en la selección de ecuaciones de atenuación

En este anexo se presenta una descripción de las siguientes metodologías empleadas en el análisis y selección de ecuaciones de atenuación:

- Análisis de residuales (Stafford et al., 2008)
- Modelo de verosimilitud (LH) (Scherbaum et al., 2004)
- Modelo del logaritmo de verosimilitud normalizado (LLH) (Scherbaum et al., 2009)
- Ranking basado en la distancia euclidiana (Kale y Akkar, 2013)

### Análisis de residuales

En términos generales, un residual representa la diferencia entre un dato observado y uno modelado. En particular, mediante el análisis de residuales se busca evaluar la distribución de probabilidad de la diferencia entre las aceleraciones observadas y las calculadas usando ecuaciones de atenuación. Los residuales normalizados se calculan a partir de la siguiente expresión (Stafford, Strasser y Bommer 2008):

$$Z_{T,ij} = \frac{\log(gm_{obs,ij}) - \log(gm_{mod,ij})}{\sigma_T} \qquad \text{Ec (H.1)}$$

En donde $Z_{T,ij}$ corresponde al residual normalizado del registro *i* del evento *j*, $gm_{obs,ij}$ corresponde al valor de la aceleración observada, $gm_{mod,ij}$ corresponde a la aceleración modelada con cierta ecuación de atenuación y un periodo estructural definido, y $\sigma_T$ corresponde a la desviación estándar propia del modelo.

Se considera que una ecuación tiene mejor ajuste cuando la media y la mediana de los residuales son cercanas a 0 y su desviación estándar es cercana a 1. Con el fin de considerar los residuales inter e intraevento se recomienda utilizar la teoría de efectos aleatorios propuesta por Youngs y Abrahamson (1992).

### Modelo de verosimilitud

El modelo de verosimilitud (Scherbaum, Cotton y Smit, 2004) asume que las ecuaciones de atenuación se pueden describir mediante una distribución lognormal (o una distribución normal del logaritmo de la intensidad del movimiento ln (Y)). Así, para una determinada magnitud M, distancia R y frecuencia F, el valor medio predicho de ln(Y) es μ(M, R, F). La probabilidad de que un valor observado $x = \ln(Y_x)$ esté en el intervalo (x, x + dx) es:

$$dF = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left(\frac{-((x-\mu)^2)}{2\sigma^2}\right) dx \qquad \text{Ec (H.2)}$$

De cada observación (x) es posible obtener residuales normalizados (z) a partir de la media μ y la desviación estándar $\sigma$ del modelo, tal como se describe en la ecuación H.1.

Teniendo en cuenta estos supuestos, la bondad de ajuste de las ecuaciones de atenuación se evalúa calculando la probabilidad de que el valor absoluto de una muestra aleatoria de los residuales normalizados (z) se encuentre en el intervalo comprendido entre el valor absoluto de una observación particular $|z_0|$ e infinito, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$LH(|z_0|) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_0}^{\infty} \exp\left(\frac{-z^2}{2}\right) * dz \qquad \text{Ec (H.3)}$$

Dicha evaluación representa la probabilidad de que un residual normalizado sea igual o mayor que $|z_0|$. El valor de LH tiene las siguientes propiedades:

- LH decrece a medida que aumenta la distancia entre las observaciones y la media del modelo. Para $|z_0| = \infty$, LH = 0.
- LH puede tener un valor máximo de 1 para $|z_0| = 0$, para el cual las observaciones coinciden con el valor medio del modelo.

Para aplicar este método se calculan los residuales normalizados de todas las observaciones de la base de datos de movimiento fuerte, y posteriormente se estiman los valores de LH$|z_0|$correspondientes. Por último, se calcula el valor medio del conjunto de valores de LH. El valor medio de LH representa las siguientes características:

- Valores cercanos a 0 indican ajustes deficientes.
- Si la varianza de los datos observados es mayor que la varianza del modelo, el valor promedio de LH es menor de 0,5.
- Si el modelo se ajusta exactamente a los valores observados, el valor medio de LH es 0,5, y los valores de LH se distribuyen equitativamente entre 0 y 1.
- Si la varianza de los datos observados es menor que la variación del modelo, el valor medio de LH es superior a 0,5.

Así, cuanto mejor sea el ajuste del modelo predictivo del movimiento, el valor medio de LH tenderá a acercarse a 0,5. A diferencia del análisis de residuales, el modelo de verosimilitud permite obtener una indicación cuantitativa del ajuste total de la ecuación de atenuación a los datos observados.

### Modelo del logaritmo de verosimilitud normalizado

Mediante el modelo del logaritmo de verosimilitud normalizado (LLH) (Scherbaum, Delavaud y Riggelsen, 2009) se desea medir la distancia entre dos modelos, f y g, descritos mediante las funciones continuas de densidad de probabilidad f(x) y g(x). En este modelo se asume que no se conoce explícitamente la función f(x), pero se conoce una muestra de N valores aleatorios que corresponden al conjunto $x = \{x_i\}$ con i = 1… N. La verosimilitud del modelo g(x), dada la muestra x es $L(g|x) = \prod_{i=1}^{N} g(x_i)$. Por su parte, el logaritmo de la función de verosimilitud se define como a $log_b(L(g|x)) = \sum_{i=1}^{N} g(x_i)$ .

Cuanto más cercanos sean los modelos f(x) y g(x), mayor es el logaritmo de la verosimilitud.

#### *Ajuste por tamaño de la muestra*

Para eliminar la dependencia en el tamaño de la muestra en la valoración de las ecuaciones de atenuación, el logaritmo de la verosimilitud se divide por el número de observaciones (N) con el fin de obtener un valor medio. De esta manera el logaritmo de la verosimilitud normalizado (LLH) se define así:

$$LLH(g) = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} log_b(g(x_i)) \qquad \text{Ec (H.4)}$$

En donde g(x) corresponde a la función de densidad de probabilidad de los residuales de la ecuación de atenuación evaluada en N puntos de control (N residuales) y b corresponde a la base del logaritmo (se utiliza base 2).

A partir del parámetro LHH es posible calcular los pesos de las diferentes ecuaciones de atenuación analizadas, utilizando la siguiente expresión:

$$W_{gi} = \frac{b^{-LLH(gi)}}{\sum_{k=1}^{K} b^{-LLH(gk)}} \qquad \text{Ec (H.5)}$$

En donde K corresponde al número total de modelos a evaluar y *gi* corresponde a la ecuación de atenuación *i*. Así, una ecuación de atenuación tendrá un mejor ajuste (tendrá un mayor peso) cuanto menor sea el parámetro LHH. Con esta expresión, la suma total de los pesos debe ser igual a 1. Este enfoque tiene ventajas sobre el modelo de verosimilitud (LH), ya que no depende del número de observaciones (se encuentra normalizado) ni de criterios subjetivos para juzgar el ajuste de las ecuaciones.

**Ranking basado en la distancia euclidiana (EDR)**

Kale y Akkar (2013) proponen un método de evaluación basado en la distancia euclidiana (DE)[1], en el cual el logaritmo de los valores observados del movimiento (a) son valores escalares, y el logaritmo del modelo predictivo (Y) sigue una distribución de probabilidad normal con media $\mu_y$ y desviación estándar $\sigma_y$. Así, para un punto de análisis (que representa cierta magnitud, distancia, tipo de falla, tipo de sitio, entre otros), la diferencia (D) entre los logaritmos de los valores observados y los predichos (a-Y) sigue también una distribución normal con media $\mu_D = a - \mu_y$ y desviación estándar $\sigma_y$.

Siguiendo la analogía con la DE, que siempre representa valores positivos, en este método se considera la distribución de probabilidad de los valores absolutos de D. La probabilidad de que el valor absoluto de D sea menor que un estimador específico *d* se define así: $P(|D|< d) = P(D < d) - P(D < -d)$. En valores discretos de D, denominados $d_j$, la probabilidad de que $|D|$ sea menor que $|d_j|$ se puede calcular considerando franjas de ancho *dd* alrededor de $d_j$, tal que:

$$p(|D|)<|d_j| = P\left(|D|< \left| d + \frac{dd}{2} \right|\right) - P\left(|D|< \left| d - \frac{dd}{2} \right|\right) \quad \text{Ec (H.6)}$$

Para efectos prácticos, Kale y Akkar (2013) recomiendan que $|d|_{max} = \max(|\mu_D \pm x\sigma_D|)$, en donde x representa un multiplicador de la desviación estándar

A partir de esta expresión, la probabilidad total de ocurrencia de un conjunto de valores $|d_j|$ (para un punto de análisis) se denomina *distancia euclidiana modificada* (MDE), y se estima con la siguiente expresión:

$$MDE_d = \sum_{j=1}^{n} |d_j| \, P\,(|D|< |d_j|) \quad \text{Ec (H.7)}$$

En donde n es el número de puntos discretos que depende del ancho de la franja dd.

Para evaluar el ajuste de las ecuaciones de atenuación, los cálculos de la distancia euclidiana modificada (realizados para un solo punto de análisis) deben repetirse en todas las observaciones de la base de datos de movimiento fuerte. Así, al realizar la suma de MDE de un conjunto de N puntos de análisis (pares de observaciones y valores predichos), se obtiene la probabilidad total de las diferencias entre los valores observados del movimiento y los valores estimados mediante las ecuaciones de atenuación. A menores valores de la suma de MDE, se consideran mejores las ecuaciones predictivas del movimiento.

***Ajuste por tamaño de la muestra***

Para eliminar la dependencia en el tamaño de la muestra, la suma de MDE se divide por el número de observaciones (N), con el fin de obtener un valor medio.

***Ajuste según el sesgo del modelo***

Una representación sesgada del movimiento del suelo puede observarse como una tendencia significativa entre los datos observados y el valor medio de las estimaciones. Para cuantificar el sesgo en la predicción de los valores medios se considera un parámetro *k*, que corresponde a la razón entre las siguientes variables:

- $MDE_{original}$: La distancia euclidiana total entre los valores observados y el valor esperado del movimiento del suelo ($a_i$-Yi).
- $MDE_{corregida}$: La distancia euclidiana entre los valores observados y los valores del movimiento del suelo, corregidos por medio del modelo predictivo derivado mediante una regresión lineal de los datos ($a_i$-$Y_{c,i}$).

Así, el parámetro *k* se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{N}(a_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(a_i - Y_{ci})^2} \quad \text{Ec (H.8)}$$

En donde $Y_{c,i} = Y_i - (Y_{fit,i} - a_i)$ y $Y_{fit,i}$ corresponde al valor derivado de la regresión lineal entre $Y_i$ y $a_i$. Así, el parámetro *k* se puede usar para penalizar los mo-

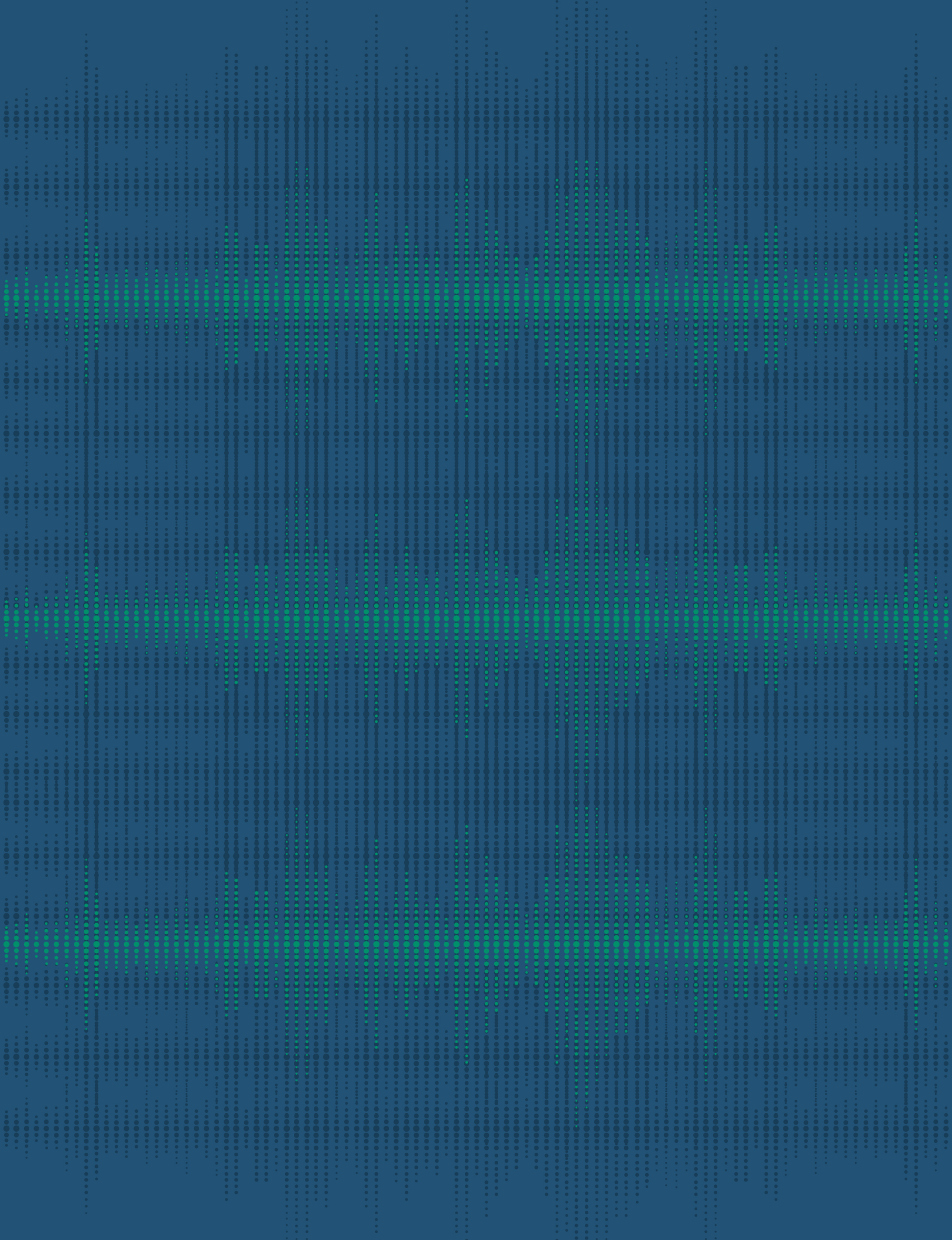
1 La distancia euclidiana (DE) se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las diferencias entre N pares de datos (pi, qi) tal que $DE = \sum_{i=1}^{N}(pi - qi)^2$. DE siempre representa valores positivos. A mayor valor de DE, mayor diferencia entre los puntos p y q.

delos predictivos que presenten un mayor sesgo en la estimación de los valores medios. Tal penalización se logra mediante la multiplicación del valor medio de MDE por el parámetro *k*. El valor óptimo de *k* es 1, y ocurre cuando las estimaciones toman valores muy cercanos a las observaciones correspondientes. Mayores valores de *k* indican un sesgo dominante en las estimaciones de la ecuación de atenuación considerada.

Con este proceso, el ranking basado en la distancia euclidiana (EDR) se puede realizar mediante la siguiente expresión:

$$EDR^2 = k * \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} MDE^2_i \qquad \text{Ec (H.9)}$$

Así, menores valores de la suma de $EDR^2$ corresponden a ecuaciones predictivas del movimiento con mejores ajustes.



I

# Propiedades geométricas utilizadas en ecuaciones de atenuación

Este anexo presenta las propiedades geométricas más relevantes para las ecuaciones de atenuación de nueva generación calculadas por estación de registro y por evento. Estas medidas geométricas fueron obtenidas utilizando las rutinas disponibles en la herramienta: Strong Motion Toolkit (SMTK), elaborada por la Fundación Global Earthquake Model. A su vez, se presenta el valor de PGA, en cm/s2, calculado como el valor de $RoT_{D50}$ para un período estructural de 0.01 segundos.

### Resultados para eventos corticales (superficiales)

**Tabla I. 1** Variables geométricas para cada registro de eventos corticales

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19940606204742 | CO_01 | CBOG1 | 286.4 | 269.1 | 269.3 | -104.6 | 287.6 | 247.9 | 19.69 |
| | CO_02 | CPENS | 290.1 | 272.6 | 273.3 | 39.3 | 291.2 | 270.3 | 16.94 |
| | CO_03 | CROSA | 283.7 | 266.1 | 266.3 | -70.6 | 285.0 | 256.5 | 10.69 |
| | CO_04 | CVHER | 254.2 | 236.7 | 237.2 | 18.0 | 255.5 | 236.3 | 6.18 |
| CO_19940913100134 | CO_05 | CANDE | 180.2 | 173.5 | 174.6 | 96.0 | 181.4 | 146.6 | 4.85 |
| | CO_06 | CANSE | 224.6 | 217.7 | 218.5 | 108.4 | 225.5 | 190.6 | 4.29 |
| | CO_07 | CFILA | 233.5 | 227.0 | 227.7 | 135.2 | 234.4 | 184.6 | 1.35 |
| | CO_08 | CRIOS | 212.8 | 206.1 | 207.0 | 117.5 | 213.7 | 171.5 | 1.59 |
| | CO_09 | CTADO | 204.2 | 196.8 | 197.5 | 26.3 | 205.1 | 195.5 | 11.14 |
| CO_19950119150505 | CO_16 | CBETA | 381.2 | 367.5 | 367.4 | -58.5 | 381.8 | 362.8 | 2.67 |
| | CO_01 | CBOG1 | 138.3 | 123.8 | 125.2 | -72.0 | 140.4 | 100.7 | 50.65 |
| | CO_12 | CCHIN | 102.8 | 88.4 | 90.5 | -34.3 | 105.7 | 81.5 | 8.92 |
| | CO_41 | CCUC1 | 322.2 | 307.6 | 307.7 | -156.5 | 322.9 | 264.8 | 5.19 |
| | CO_07 | CFILA | 298.7 | 285.9 | 286.2 | -246.9 | 299.6 | 144.2 | 1.38 |
| | CO_13 | CGUAD | 188.8 | 175.6 | 176.3 | -145.5 | 190.2 | 98.2 | 16.23 |
| | CO_10 | CNORC | 228.1 | 216.7 | 217.2 | -204.0 | 229.2 | 73.3 | 9.46 |
| | CO_02 | CPENS | 255.2 | 242.8 | 243.3 | -217.4 | 256.3 | 108.1 | 12.53 |
| | CO_19 | CPLA1 | 268.3 | 260.0 | 260.3 | -259.6 | 269.3 | 14.3 | 6.07 |
| | CO_22 | CPRAD | 262.1 | 247.8 | 248.1 | -82.4 | 263.1 | 233.7 | 7.19 |
| | CO_14 | CQUET | 131.6 | 117.5 | 118.7 | -31.5 | 133.6 | 113.1 | 18.98 |
| | CO_08 | CRIOS | 317.1 | 304.6 | 304.8 | -268.9 | 318.0 | 143.1 | 1.18 |
| | CO_03 | CROSA | 159.9 | 145.9 | 147.1 | -107.0 | 161.8 | 99.2 | 12.35 |
| | CO_15 | CSRA1 | 126.5 | 112.0 | 113.6 | -68.4 | 128.8 | 88.6 | 17.36 |
| | CO_04 | CVHER | 247.4 | 234.0 | 234.5 | -189.6 | 248.6 | 137.1 | 5.70 |
| | CO_11 | CVIL1 | 124.2 | 111.4 | 112.6 | -1.7 | 126.2 | 111.3 | 24.49 |
| CO_19950120135924 | CO_12 | CCHIN | 106.1 | 104.2 | 118.9 | 95.0 | 120.8 | 47.9 | 1.10 |
| | CO_13 | CGUAD | 181.4 | 180.3 | 188.2 | 181.9 | 189.8 | 18.2 | 1.62 |
| | CO_14 | CQUET | 136.7 | 134.6 | 145.5 | 116.7 | 147.8 | 71.1 | 2.36 |
| | CO_15 | CSRA1 | 125.1 | 123.8 | 136.2 | 123.2 | 137.8 | 27.3 | 2.11 |
| | CO_11 | CVIL1 | 133.3 | 130.9 | 141.7 | 95.4 | 144.3 | 92.1 | 5.83 |
| CO_19950122104129 | CO_12 | CCHIN | 103.4 | 98.2 | 101.1 | -16.2 | 106.7 | 96.9 | 1.51 |
| | CO_13 | CGUAD | 180.1 | 175.3 | 176.9 | 77.6 | 181.8 | 159.1 | 2.52 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19950122104129 | CO_14 | CQUET | 133.8 | 128.5 | 130.4 | -32.0 | 136.1 | 124.4 | 3.05 |
| | CO_15 | CSRA1 | 122.9 | 118.1 | 120.8 | 11.8 | 125.8 | 117.8 | 3.13 |
| | CO_11 | CVIL1 | 130.2 | 124.7 | 126.4 | -58.3 | 132.4 | 110.2 | 5.54 |
| CO_19950423235543 | CO_11 | CVIL1 | 168.9 | 165.9 | 171.6 | 56.1 | 174.9 | 156.8 | 4.40 |
| CO_19951003015125 | CO_16 | CBETA | 660.1 | 638.3 | 637.3 | 337.7 | 661.0 | 551.5 | 3.34 |
| | CO_01 | CBOG1 | 919.5 | 897.3 | 894.9 | 422.7 | 920.2 | 799.3 | 4.98 |
| | CO_15 | CSRA1 | 930.7 | 908.5 | 906.1 | 422.6 | 931.4 | 811.8 | 2.42 |
| CO_19961104172500 | CO_05 | CANDE | 254.0 | 244.0 | 244.3 | -188.8 | 254.8 | 154.6 | 1.81 |
| | CO_06 | CANSE | 294.5 | 284.2 | 284.4 | -204.3 | 295.2 | 197.5 | 1.61 |
| | CO_28 | CBSOL | 127.5 | 117.3 | 118.0 | -14.9 | 128.8 | 116.3 | 8.82 |
| | CO_07 | CFILA | 308.6 | 298.6 | 298.7 | -230.6 | 309.2 | 189.7 | 4.00 |
| | CO_38 | CPAMP | 527.9 | 521.7 | 521.3 | -517.3 | 528.3 | 67.5 | 1.66 |
| | CO_34 | CPER2 | 341.4 | 330.9 | 330.9 | -221.6 | 342.0 | 245.7 | 3.92 |
| | CO_03 | CROSA | 443.3 | 434.2 | 434.1 | -374.5 | 443.8 | 219.4 | 2.77 |
| CO_19980623013633 | CO_77 | COCAN | 421.7 | 418.5 | 418.6 | 319.8 | 422.9 | 269.7 | 1.02 |
| CO_19990125181918 | CO_05 | CANDE | 139.7 | 134.3 | 135.4 | -121.8 | 141.7 | 56.4 | 9.47 |
| | CO_59 | CARBE | 137.8 | 129.3 | 130.4 | -19.1 | 139.9 | 127.9 | 6.76 |
| | CO_60 | CARME | 14.2 | 11.8 | 22.0 | -11.8 | 27.9 | 0.0 | 520.95 |
| | CO_16 | CBETA | 193.2 | 189.1 | 190.5 | 177.6 | 194.6 | 71.9 | 6.07 |
| | CO_79 | CBOCA | 39.3 | 36.3 | 40.7 | -36.3 | 46.1 | 1.2 | 69.73 |
| | CO_01 | CBOG1 | 177.2 | 168.8 | 169.7 | -72.2 | 178.9 | 152.6 | 5.53 |
| | CO_235 | CBOG1_R | 177.2 | 168.8 | 169.7 | -72.2 | 178.9 | 152.6 | 1.26 |
| | CO_61 | CBOG2 | 178.8 | 170.4 | 171.4 | -68.6 | 180.6 | 156.0 | 3.91 |
| | CO_29 | CBUC1 | 410.5 | 405.0 | 404.9 | -363.3 | 411.2 | 178.9 | 0.97 |
| | CO_30 | CBUEN | 166.3 | 159.3 | 160.9 | 104.7 | 167.8 | 122.4 | 18.46 |
| | CO_31 | CCALI | 140.5 | 136.4 | 138.6 | 128.9 | 142.5 | 51.8 | 21.53 |
| | CO_80 | CCAST | 44.1 | 37.2 | 41.4 | -29.8 | 50.1 | 22.3 | 200.06 |
| | CO_49 | CCOLO | 151.0 | 143.7 | 145.7 | 85.5 | 152.8 | 117.4 | 14.87 |
| | CO_41 | CCUC1 | 518.4 | 513.2 | 512.7 | -467.4 | 518.9 | 211.6 | 1.22 |
| | CO_18 | CDAGU | 144.1 | 138.6 | 140.8 | 117.8 | 146.0 | 77.4 | 3.79 |
| | CO_32 | CECAL | 116.5 | 110.4 | 113.3 | 88.9 | 118.9 | 69.1 | 2.33 |
| | CO_07 | CFILA | 97.1 | 94.0 | 95.8 | -93.5 | 100.1 | 9.7 | 9.24 |
| | CO_33 | CFLAN | 29.1 | 27.0 | 32.9 | -27.0 | 38.0 | 0.0 | 497.05 |
| | CO_65 | CFLOR | 316.4 | 313.3 | 313.6 | 304.1 | 317.3 | 85.3 | 4.05 |
| | CO_82 | CGARZ | 249.0 | 245.7 | 246.6 | 238.0 | 250.1 | 70.7 | 6.46 |
| | CO_13 | CGUAD | 138.5 | 131.5 | 132.6 | -100.6 | 140.5 | 84.7 | 6.26 |
| | CO_51 | CMAN1 | 74.1 | 71.9 | 74.3 | -71.9 | 78.1 | 0.0 | 94.86 |
| | CO_69 | CNEIV | 171.2 | 166.3 | 167.9 | 147.6 | 172.8 | 81.6 | 16.42 |
| | CO_10 | CNORC | 153.9 | 149.7 | 150.6 | -144.6 | 155.6 | 38.9 | 6.50 |
| | CO_77 | COCAN | 496.6 | 492.7 | 492.3 | -479.2 | 497.2 | 114.4 | 1.11 |
| | CO_02 | CPENS | 120.8 | 117.7 | 119.1 | -116.8 | 123.3 | 13.9 | 21.63 |
| | CO_72 | CPLAT | 228.8 | 226.7 | 227.7 | 227.1 | 230.1 | 32.2 | 7.69 |
| | CO_21 | CPOP2 | 242.2 | 240.4 | 241.4 | 241.7 | 243.4 | 26.1 | 5.08 |
| | CO_83 | CPOP4 | 242.9 | 241.0 | 242.0 | 242.2 | 244.1 | 27.1 | 5.19 |
| | CO_22 | CPRAD | 113.8 | 105.9 | 108.4 | 48.4 | 116.1 | 95.5 | 2.35 |
| | CO_08 | CRIOS | 111.1 | 106.6 | 108.2 | -102.4 | 113.7 | 29.9 | 7.00 |
| | CO_03 | CROSA | 155.9 | 147.9 | 149.1 | -86.0 | 158.0 | 120.4 | 0.51 |
| | CO_84 | CSJGU | 397.3 | 389.0 | 389.0 | 103.1 | 397.9 | 375.8 | 3.34 |
| | CO_46 | CSONS | 143.8 | 141.8 | 142.9 | -141.8 | 145.9 | 0.0 | 4.95 |
| | CO_56 | CTOCH | 101.2 | 99.2 | 102.5 | 101.3 | 104.1 | 10.8 | 3.25 |
| | CO_26 | CTUTU | 176.1 | 168.4 | 169.1 | -109.7 | 177.5 | 127.8 | 5.09 |
| | CO_04 | CVHER | 90.2 | 85.2 | 87.2 | -79.9 | 93.5 | 29.7 | 5.76 |
| | CO_11 | CVIL1 | 226.3 | 217.7 | 218.1 | -37.3 | 227.4 | 214.5 | 3.04 |
| CO_20000117122008 | CO_01 | CBOG1 | 323.9 | 321.5 | 323.9 | 308.6 | 327.3 | 102.0 | 1.18 |
| | CO_235 | CBOG1_R | 323.9 | 321.5 | 323.9 | 308.6 | 327.3 | 102.0 | 0.19 |
| | CO_29 | CBUC1 | 123.1 | 119.4 | 127.6 | 89.6 | 131.3 | 83.0 | 1.27 |
| | CO_76 | CBUC4 | 132.4 | 128.7 | 136.2 | 99.2 | 140.0 | 86.5 | 2.69 |
| | CO_86 | CBUC5 | 120.2 | 116.5 | 125.0 | 92.7 | 128.5 | 75.4 | 2.79 |
| | CO_40 | CBUIS | 130.5 | 126.6 | 134.4 | 90.6 | 138.2 | 92.2 | 3.18 |
| | CO_47 | CSUES | 151.5 | 149.0 | 156.0 | 144.4 | 158.7 | 49.5 | 2.27 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20000523163648 | CO_71 | CPAS2 | 160.0 | 157.1 | 162.9 | 45.6 | 166.0 | 151.0 | 2.62 |
| | CO_55 | CSAMA | 123.6 | 120.7 | 128.0 | 22.0 | 131.0 | 119.1 | 12.21 |
| CO_20001008201230 | CO_71 | CPAS2 | 131.8 | 130.2 | 130.9 | 118.1 | 132.5 | 58.7 | 1.09 |
| | CO_55 | CSAMA | 121.3 | 119.1 | 119.8 | 86.9 | 121.9 | 83.4 | 2.05 |
| CO_20010908224510 | CO_88 | CMONT | 123.5 | 121.0 | 123.2 | -33.5 | 126.3 | 116.2 | 8.40 |
| CO_20020426013626 | CO_01 | CBOG1 | 223.7 | 220.8 | 222.1 | -49.2 | 225.5 | 215.3 | 1.03 |
| | CO_235 | CBOG1_R | 223.7 | 220.8 | 222.1 | -49.2 | 225.5 | 215.3 | 0.15 |
| | CO_91 | CNOBS | 117.0 | 114.6 | 117.7 | -105.1 | 120.4 | 45.8 | 3.69 |
| | CO_19 | CPLA1 | 152.3 | 150.2 | 152.4 | 118.6 | 154.7 | 94.8 | 4.16 |
| | CO_93 | CTUN1 | 118.2 | 115.3 | 118.4 | -74.2 | 121.7 | 88.2 | 1.48 |
| CO_20040220111558 | CO_96 | CGUAG | 136.1 | 134.8 | 140.1 | -127.7 | 142.0 | 43.0 | 4.69 |
| CO_20040818070652 | CO_62 | CBORD | 41.7 | 39.2 | 45.9 | -3.5 | 48.9 | 39.0 | 10.17 |
| | CO_72 | CPLAT | 81.6 | 79.1 | 82.6 | 11.5 | 85.5 | 78.4 | 3.65 |
| | CO_20 | CPOP1 | 23.1 | 22.1 | 33.1 | -21.5 | 35.0 | 5.2 | 13.24 |
| | CO_21 | CPOP2 | 26.8 | 25.4 | 35.4 | -23.3 | 37.5 | 10.2 | 19.87 |
| | CO_78 | CPOP3 | 30.0 | 28.4 | 37.7 | -24.5 | 40.0 | 14.5 | 23.82 |
| | CO_83 | CPOP4 | 26.4 | 25.1 | 35.2 | -23.5 | 37.3 | 9.1 | 31.50 |
| | CO_97 | CVERS | 265.9 | 264.4 | 265.1 | -227.8 | 267.3 | 134.3 | 1.14 |
| | CO_98 | RAC02 | 128.7 | 127.4 | 129.4 | -115.8 | 131.2 | 53.1 | 2.02 |
| | CO_99 | RAC05 | 135.0 | 133.7 | 135.6 | -122.5 | 137.4 | 53.6 | 1.85 |
| | CO_100 | RAC07 | 139.2 | 137.8 | 139.7 | -126.0 | 141.5 | 55.8 | 1.52 |
| CO_20070306130508 | CO_62 | CBORD | 48.9 | 46.1 | 49.0 | 7.0 | 52.0 | 45.8 | 16.44 |
| | CO_64 | CCRUZ | 72.5 | 70.8 | 73.4 | 66.1 | 75.0 | 29.7 | 6.51 |
| | CO_72 | CPLAT | 78.7 | 75.7 | 77.3 | -47.0 | 80.6 | 59.3 | 3.19 |
| | CO_21 | CPOP2 | 42.7 | 40.6 | 43.8 | -39.0 | 46.4 | 11.2 | 12.84 |
| | CO_78 | CPOP3 | 45.0 | 43.1 | 46.3 | -42.3 | 48.6 | 8.3 | 32.18 |
| | CO_83 | CPOP4 | 42.6 | 40.4 | 43.7 | -38.5 | 46.3 | 12.2 | 23.63 |
| CO_20070424085334 | CO_06 | CANSE | 40.8 | 38.4 | 65.2 | 21.0 | 67.9 | 32.7 | 111.33 |
| | CO_07 | CFILA | 50.6 | 49.3 | 72.1 | 45.6 | 74.0 | 20.5 | 5.30 |
| | CO_13 | CGUAD | 156.6 | 156.2 | 164.6 | 156.5 | 165.5 | 11.4 | 3.01 |
| | CO_122 | CNOCA | 113.2 | 112.3 | 123.7 | 109.9 | 125.0 | 26.6 | 6.36 |
| | CO_04 | CVHER | 107.4 | 106.4 | 119.0 | 101.9 | 120.4 | 33.1 | 4.63 |
| CO_20070620190407 | CO_29 | CBUC1 | 93.5 | 90.8 | 94.6 | 47.1 | 97.3 | 78.8 | 4.61 |
| | CO_40 | CBUIS | 98.3 | 95.6 | 99.2 | 56.4 | 101.8 | 78.7 | 8.70 |
| | CO_121 | CCUC3 | 88.0 | 86.8 | 90.6 | 87.3 | 91.8 | 16.7 | 3.47 |
| | CO_85 | CSARD | 120.6 | 119.9 | 122.6 | 122.0 | 123.4 | 1.1 | 2.50 |
| | CO_123 | CTUN3 | 215.0 | 211.8 | 213.2 | -77.1 | 216.9 | 197.3 | 1.14 |
| CO_20070716225823 | CO_29 | CBUC1 | 98.4 | 95.7 | 101.0 | 60.4 | 103.7 | 76.1 | 3.24 |
| | CO_40 | CBUIS | 102.8 | 100.1 | 105.2 | 69.5 | 107.8 | 74.4 | 4.81 |
| | CO_42 | CCUC2 | 87.3 | 85.6 | 91.3 | 83.3 | 92.9 | 28.1 | 5.07 |
| | CO_121 | CCUC3 | 85.2 | 83.6 | 89.5 | 82.4 | 91.0 | 24.7 | 6.64 |
| | CO_66 | CFQNE | 255.3 | 252.3 | 253.9 | -19.8 | 257.5 | 251.5 | 0.73 |
| | CO_85 | CSARD | 119.0 | 117.8 | 121.9 | 119.3 | 123.2 | 15.4 | 7.93 |
| CO_20080524192044 | CO_39 | CANAP | 91.5 | 85.3 | 86.6 | 5.8 | 93.5 | 85.1 | 4.76 |
| | CO_06 | CANSE | 253.2 | 247.1 | 247.4 | -30.9 | 254.1 | 245.2 | 0.83 |
| | CO_59 | CARBE | 81.6 | 76.1 | 77.8 | 35.4 | 84.2 | 67.5 | 5.77 |
| | CO_60 | CARME | 217.3 | 211.3 | 211.7 | 39.9 | 218.3 | 207.5 | 9.58 |
| | CO_01 | CBOG1 | 50.8 | 45.1 | 48.2 | -17.2 | 55.2 | 41.7 | 32.02 |
| | CO_235 | CBOG1_R | 50.8 | 45.1 | 48.2 | -17.2 | 55.2 | 41.7 | 8.18 |
| | CO_61 | CBOG2 | 46.5 | 40.6 | 44.2 | -13.5 | 51.3 | 38.3 | 57.68 |
| | CO_29 | CBUC1 | 308.2 | 307.8 | 307.9 | -307.7 | 308.8 | 9.3 | 0.82 |
| | CO_17 | CCALA | 213.4 | 207.4 | 207.8 | 44.0 | 214.4 | 202.7 | 1.99 |
| | CO_121 | CCUC3 | 411.1 | 410.7 | 410.5 | -410.5 | 411.5 | 14.2 | 0.66 |
| | CO_07 | CFILA | 230.2 | 224.2 | 224.5 | -42.1 | 231.2 | 220.2 | 0.86 |
| | CO_66 | CFQNE | 121.6 | 119.9 | 121.0 | -116.0 | 123.5 | 30.2 | 7.28 |
| | CO_13 | CGUAD | 124.4 | 118.7 | 119.6 | -47.0 | 126.0 | 109.0 | 10.85 |
| | CO_50 | CIBA1 | 169.5 | 163.5 | 164.1 | 38.7 | 170.7 | 158.9 | 6.06 |
| | CO_105 | CIBA3 | 164.2 | 158.2 | 158.9 | 38.9 | 165.4 | 153.4 | 6.50 |
| | CO_51 | CMAN1 | 216.0 | 209.9 | 210.4 | -20.2 | 217.1 | 208.9 | 3.26 |
| | CO_77 | COCAN | 432.0 | 430.8 | 430.6 | -424.9 | 432.4 | 71.2 | 1.39 |

(.../...)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20080524192044 | CO_02 | CPENS | 196.5 | 190.7 | 191.2 | -64.6 | 197.6 | 179.4 | 9.14 |
| | CO_22 | CPRAD | 148.1 | 143.7 | 144.4 | 102.3 | 149.4 | 101.1 | 4.57 |
| | CO_14 | CQUET | 17.6 | 12.9 | 20.7 | 9.5 | 27.0 | 8.8 | 563.01 |
| | CO_124 | CREAC | 51.1 | 45.3 | 48.5 | -16.2 | 55.5 | 42.3 | 32.59 |
| | CO_03 | CROSA | 85.8 | 80.1 | 82.0 | -31.6 | 88.6 | 73.6 | 3.68 |
| | CO_84 | CSJGU | 236.5 | 232.1 | 232.4 | 162.5 | 237.3 | 165.7 | 17.29 |
| | CO_25 | CTRUJ | 290.3 | 284.5 | 284.7 | 96.0 | 291.0 | 267.9 | 0.55 |
| | CO_116 | CTUN2 | 136.4 | 136.3 | 137.3 | -136.3 | 138.1 | 0.0 | 16.58 |
| | CO_123 | CTUN3 | 136.9 | 136.8 | 137.8 | -136.8 | 138.6 | 0.0 | 3.49 |
| | CO_11 | CVIL1 | 23.1 | 20.2 | 25.3 | 18.9 | 30.2 | 7.3 | 60.97 |
| | CO_127 | CYOPA | 181.2 | 177.5 | 178.0 | -145.9 | 182.2 | 101.2 | 2.00 |
| CO_20090912200625 | CO_121 | CCUC3 | 588.0 | 580.9 | 580.1 | 475.9 | 588.3 | 336.9 | 1.68 |
| | CO_50 | CIBA1 | 1060.2 | 1051.9 | 1049.3 | 754.8 | 1060.3 | 732.5 | 1.57 |
| CO_20100326015638 | CO_71 | CPAS2 | 302.7 | 302.3 | 302.5 | -296.6 | 303.3 | 58.5 | 0.06 |
| | CO_126 | CTUM2 | 348.7 | 347.3 | 347.2 | -258.7 | 349.1 | 231.6 | 0.03 |
| CO_20100605011959 | CO_128 | CMON2 | 598.0 | 597.5 | 596.7 | 598.3 | 598.3 | 25.7 | 0.01 |
| | CO_126 | CTUM2 | 783.8 | 781.9 | 780.4 | 218.8 | 784.0 | 750.7 | 0.01 |
| CO_20100729193445 | CO_39 | CANAP | 96.3 | 93.9 | 99.6 | 8.6 | 102.5 | 93.6 | 10.89 |
| | CO_59 | CARBE | 82.4 | 80.0 | 87.6 | 35.7 | 89.9 | 72.3 | 5.44 |
| | CO_60 | CARME | 96.4 | 94.9 | 100.9 | -93.3 | 102.9 | 17.7 | 31.25 |
| | CO_27 | CBMAL | 249.0 | 246.8 | 248.4 | -205.1 | 251.4 | 137.4 | 0.51 |
| | CO_17 | CCALA | 90.1 | 88.7 | 95.1 | -87.3 | 97.2 | 15.6 | 14.45 |
| | CO_12 | CCHIN | 170.6 | 168.2 | 172.0 | 78.8 | 174.6 | 149.3 | 0.84 |
| | CO_121 | CCUC3 | 525.9 | 523.4 | 523.0 | -37.3 | 527.1 | 522.1 | 0.56 |
| | CO_65 | CFLOR | 265.3 | 262.9 | 264.6 | 106.1 | 267.6 | 241.1 | 2.45 |
| | CO_50 | CIBA1 | 62.7 | 60.5 | 69.4 | -48.4 | 72.2 | 36.3 | 41.42 |
| | CO_128 | CMON2 | 558.7 | 556.4 | 555.8 | -433.5 | 559.8 | 348.3 | 0.02 |
| | CO_69 | CNEIV | 109.0 | 106.6 | 112.1 | 49.2 | 114.4 | 95.3 | 8.01 |
| | CO_130 | CPALE | 135.4 | 133.2 | 137.5 | -111.4 | 140.3 | 73.1 | 3.62 |
| | CO_71 | CPAS2 | 384.0 | 381.6 | 382.3 | -11.4 | 385.8 | 381.4 | 0.14 |
| | CO_124 | CREAC | 137.7 | 135.3 | 140.0 | 40.6 | 142.6 | 129.5 | 3.14 |
| | CO_03 | CROSA | 135.2 | 132.7 | 137.3 | 5.9 | 140.3 | 132.7 | 2.55 |
| | CO_126 | CTUM2 | 465.3 | 462.7 | 462.6 | -183.2 | 466.6 | 424.8 | 0.04 |
| | CO_129 | CURIB | 931.9 | 929.4 | 926.7 | -250.7 | 932.6 | 894.4 | 0.03 |
| | CO_11 | CVIL1 | 163.8 | 161.7 | 165.2 | 111.0 | 167.5 | 119.0 | 3.26 |
| CO_20110302185048 | CO_131 | CBAR2 | 348.6 | 342.3 | 343.1 | -174.9 | 350.5 | 294.3 | 0.55 |
| | CO_132 | CBAR3 | 352.8 | 346.6 | 347.2 | -173.0 | 354.7 | 300.2 | 0.52 |
| | CO_121 | CCUC3 | 495.3 | 492.0 | 491.8 | -491.9 | 496.6 | 11.3 | 1.83 |
| | CO_50 | CIBA1 | 498.5 | 492.3 | 492.1 | -270.9 | 499.9 | 410.8 | 0.54 |
| | CO_51 | CMAN1 | 421.3 | 415.0 | 415.4 | -225.9 | 423.0 | 348.0 | 0.59 |
| | CO_88 | CMONT | 122.4 | 117.6 | 122.0 | -110.4 | 127.6 | 40.3 | 6.51 |
| CO_20130516162918 | CO_140 | CCODA | 233.1 | 232.5 | 234.5 | 228.9 | 235.7 | 45.1 | 0.16 |
| | CO_122 | CNOCA | 735.6 | 734.7 | 733.2 | 670.9 | 736.5 | 300.1 | 0.02 |
| CO_20130516162918 | CO_151 | CSTM1 | 127.5 | 126.0 | 130.5 | 77.4 | 132.1 | 100.0 | 0.66 |
| | CO_129 | CURIB | 163.7 | 162.0 | 165.3 | 69.1 | 167.3 | 146.9 | 0.66 |
| CO_20130806025012 | CO_28 | CBSOL | 107.7 | 105.7 | 110.0 | -21.2 | 112.5 | 103.5 | 1.18 |
| | CO_140 | CCODA | 522.5 | 520.6 | 520.1 | -305.8 | 523.5 | 421.0 | 0.01 |
| | CO_122 | CNOCA | 323.5 | 322.3 | 323.1 | -310.7 | 325.2 | 85.9 | 0.04 |
| | CO_03 | CROSA | 419.8 | 418.5 | 418.9 | -393.3 | 421.3 | 142.8 | 0.02 |
| | CO_126 | CTUM2 | 617.0 | 615.0 | 614.1 | -32.3 | 617.8 | 614.2 | 0.00 |
| | CO_129 | CURIB | 768.5 | 766.5 | 764.8 | -392.2 | 769.2 | 657.7 | 0.01 |
| | CO_153 | CVALL | 577.5 | 575.5 | 574.8 | -304.6 | 578.4 | 488.0 | 0.02 |
| | CO_139 | CYOTO | 371.6 | 369.6 | 370.1 | -210.0 | 373.1 | 304.1 | 0.02 |
| CO_20130825233555 | CO_28 | CBSOL | 308.4 | 308.1 | 308.5 | 308.0 | 309.5 | 21.8 | 0.15 |
| | CO_140 | CCODA | 307.2 | 306.0 | 306.4 | -285.8 | 308.3 | 109.3 | 0.28 |
| | CO_154 | CLOBA | 164.8 | 163.7 | 165.3 | -157.4 | 166.8 | 45.0 | 4.45 |
| | CO_122 | CNOCA | 231.5 | 229.7 | 230.8 | 120.8 | 233.0 | 195.7 | 0.64 |
| | CO_03 | CROSA | 319.9 | 318.0 | 318.8 | 116.9 | 321.2 | 296.0 | 0.13 |
| | CO_129 | CURIB | 559.2 | 558.0 | 557.3 | -527.8 | 559.8 | 180.7 | 0.06 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20130825233555 | CO_153 | CVALL | 372.0 | 370.7 | 370.8 | -338.9 | 372.9 | 150.1 | 0.17 |
| | CO_139 | CYOTO | 433.0 | 431.7 | 431.6 | 355.7 | 433.9 | 245.5 | 0.01 |
| CO_20140105033638 | CO_06 | CANSE | 120.8 | 117.1 | 122.0 | 47.5 | 126.5 | 107.2 | 4.75 |
| | CO_60 | CARME | 113.7 | 111.8 | 117.1 | 101.5 | 119.6 | 47.9 | 28.99 |
| | CO_27 | CBMAL | 97.8 | 93.9 | 99.3 | -28.7 | 104.1 | 89.4 | 4.34 |
| | CO_79 | CBOCA | 116.7 | 114.1 | 119.2 | 90.2 | 122.5 | 70.4 | 1.79 |
| | CO_01 | CBOG1 | 288.7 | 286.5 | 288.4 | 248.1 | 291.2 | 144.0 | 0.65 |
| | CO_28 | CBSOL | 196.6 | 194.1 | 196.3 | -158.6 | 199.8 | 111.9 | 0.56 |
| | CO_17 | CCALA | 117.6 | 115.9 | 121.0 | 107.1 | 123.4 | 45.1 | 5.46 |
| | CO_155 | CCNEG | 336.2 | 334.7 | 335.9 | 314.8 | 338.2 | 114.7 | 0.90 |
| | CO_140 | CCODA | 691.8 | 687.8 | 686.5 | 11.3 | 692.7 | 687.7 | 0.02 |
| | CO_141 | CCUFI | 383.0 | 379.2 | 380.2 | 124.4 | 385.0 | 358.3 | 0.10 |
| | CO_18 | CDAGU | 105.7 | 102.2 | 107.6 | 50.9 | 111.9 | 88.9 | 5.52 |
| | CO_32 | CECAL | 81.6 | 78.5 | 85.7 | 52.4 | 89.6 | 58.8 | 5.46 |
| | CO_07 | CFILA | 145.5 | 141.9 | 145.9 | 69.0 | 150.2 | 124.3 | 0.54 |
| | CO_65 | CFLOR | 355.3 | 352.6 | 353.5 | 267.7 | 357.1 | 229.8 | 0.24 |
| | CO_156 | CMACA | 417.3 | 416.4 | 416.8 | 410.0 | 418.8 | 75.0 | 0.38 |
| | CO_51 | CMAN1 | 138.9 | 135.7 | 140.0 | 85.3 | 143.9 | 105.8 | 6.55 |
| | CO_122 | CNOCA | 227.5 | 224.0 | 226.1 | 121.0 | 230.3 | 188.8 | 0.46 |
| | CO_70 | CPAS1 | 386.7 | 382.9 | 383.7 | 128.9 | 388.6 | 360.6 | 0.08 |
| | CO_157 | CPER3 | 107.2 | 104.5 | 110.0 | 80.0 | 113.4 | 67.7 | 16.11 |
| | CO_126 | CTUM2 | 383.7 | 379.7 | 380.1 | -41.7 | 385.4 | 377.4 | 0.12 |
| | CO_26 | CTUTU | 127.5 | 123.7 | 127.7 | -49.7 | 132.4 | 113.3 | 12.26 |
| | CO_97 | CVERS | 52.9 | 51.2 | 62.1 | 47.9 | 64.9 | 19.2 | 70.62 |
| | CO_139 | CYOTO | 79.0 | 76.9 | 84.2 | 67.6 | 87.1 | 37.3 | 14.45 |
| | CO_98 | RAC02 | 138.5 | 135.2 | 139.3 | 83.8 | 143.2 | 106.4 | 8.03 |
| CO_20140109125017 | CO_60 | CARME | 173.9 | 171.8 | 172.5 | -94.7 | 174.9 | 143.4 | 5.41 |
| | CO_27 | CBMAL | 190.9 | 190.4 | 190.7 | -189.0 | 191.6 | 22.8 | 0.46 |
| | CO_79 | CBOCA | 198.9 | 196.9 | 197.4 | -110.7 | 199.8 | 162.8 | 0.35 |
| | CO_01 | CBOG1 | 273.5 | 271.2 | 271.5 | 26.8 | 274.2 | 269.9 | 1.99 |
| | CO_155 | CCNEG | 276.6 | 274.4 | 274.7 | 98.3 | 277.2 | 256.3 | 2.66 |
| | CO_140 | CCODA | 816.9 | 814.7 | 813.3 | -324.5 | 817.1 | 746.7 | 0.01 |
| | CO_49 | CCOLO | 131.7 | 129.6 | 130.7 | 64.4 | 132.9 | 112.7 | 7.97 |
| | CO_141 | CCUFI | 253.6 | 251.3 | 251.8 | 20.7 | 254.4 | 250.5 | 0.13 |
| | CO_18 | CDAGU | 112.0 | 111.6 | 112.7 | -111.6 | 113.4 | 4.4 | 1.83 |
| | CO_32 | CECAL | 119.3 | 118.6 | 119.7 | -116.8 | 120.7 | 20.6 | 2.70 |
| | CO_65 | CFLOR | 162.3 | 160.8 | 161.6 | 131.4 | 163.2 | 93.2 | 1.60 |
| | CO_13 | CGUAD | 272.1 | 269.8 | 270.0 | -46.7 | 272.7 | 265.7 | 1.17 |
| | CO_156 | CMACA | 250.7 | 249.9 | 250.2 | 235.3 | 251.3 | 84.8 | 2.30 |
| | CO_51 | CMAN1 | 233.9 | 231.9 | 232.3 | -123.4 | 234.7 | 196.3 | 2.10 |
| | CO_122 | CNOCA | 306.8 | 304.6 | 304.6 | -107.1 | 307.3 | 285.1 | 0.42 |
| | CO_70 | CPAS1 | 255.3 | 253.0 | 253.4 | 25.5 | 256.1 | 251.7 | 0.09 |
| | CO_137 | CPGA1 | 272.3 | 270.1 | 270.4 | 25.8 | 273.0 | 268.8 | 1.65 |
| | CO_72 | CPLAT | 70.2 | 68.5 | 70.6 | 49.9 | 72.5 | 47.2 | 6.08 |
| | CO_126 | CTUM2 | 337.8 | 335.6 | 335.5 | -136.9 | 338.2 | 306.3 | 0.06 |
| | CO_97 | CVERS | 176.0 | 174.5 | 175.1 | -140.5 | 177.0 | 103.4 | 4.03 |
| | CO_04 | CVHER | 241.5 | 239.3 | 239.7 | -87.1 | 242.3 | 222.9 | 0.82 |
| | CO_11 | CVIL1 | 285.2 | 283.0 | 283.2 | 97.8 | 285.7 | 265.7 | 1.58 |
| | CO_139 | CYOTO | 117.0 | 115.9 | 116.9 | -106.8 | 118.4 | 45.0 | 1.18 |
| | CO_98 | RAC02 | 77.5 | 76.8 | 78.5 | -75.5 | 79.5 | 14.1 | 5.10 |
| CO_20140217094136 | CO_01 | CBOG1 | 334.9 | 333.8 | 335.8 | 335.3 | 338.0 | 28.4 | 0.93 |
| | CO_28 | CBSOL | 629.4 | 626.6 | 625.8 | 474.5 | 630.8 | 411.6 | 0.05 |
| | CO_155 | CCNEG | 346.1 | 344.9 | 346.5 | 345.6 | 348.8 | 37.1 | 1.94 |
| | CO_140 | CCODA | 424.2 | 420.5 | 421.1 | -125.7 | 426.4 | 401.3 | 0.29 |
| | CO_42 | CCUC2 | 174.8 | 171.2 | 175.6 | -43.3 | 180.0 | 165.6 | 4.89 |
| | CO_141 | CCUFI | 858.2 | 857.4 | 855.4 | 860.0 | 859.5 | 10.1 | 0.01 |
| | CO_65 | CFLOR | 701.6 | 700.4 | 699.1 | 697.7 | 702.9 | 86.5 | 0.07 |
| | CO_66 | CFQNE | 252.2 | 250.5 | 253.8 | 243.9 | 256.2 | 67.6 | 2.08 |
| | CO_152 | CGIR2 | 165.8 | 162.5 | 167.8 | 76.0 | 171.4 | 145.0 | 5.17 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20140217094136 | CO_156 | CMACA | 541.2 | 539.3 | 539.1 | 510.2 | 542.8 | 181.8 | 0.74 |
| | CO_51 | CMAN1 | 450.7 | 448.6 | 449.4 | 415.6 | 452.9 | 175.1 | 0.45 |
| | CO_122 | CNOCA | 364.5 | 362.3 | 363.6 | 326.2 | 367.0 | 162.9 | 0.46 |
| | CO_158 | CPAM3 | 140.3 | 136.9 | 143.5 | 12.1 | 147.2 | 136.6 | 6.18 |
| | CO_38 | CPAMP | 139.1 | 135.8 | 142.3 | 8.7 | 146.1 | 135.6 | 25.80 |
| | CO_70 | CPAS1 | 859.2 | 858.4 | 856.3 | 861.0 | 860.4 | 5.3 | 0.01 |
| | CO_03 | CROSA | 343.3 | 341.9 | 343.8 | 338.6 | 346.3 | 63.3 | 0.23 |
| | CO_151 | CSTM1 | 584.9 | 581.2 | 580.6 | -159.9 | 586.4 | 558.7 | 0.15 |
| | CO_123 | CTUN3 | 211.0 | 209.5 | 213.8 | 207.2 | 215.8 | 45.5 | 0.94 |
| | CO_129 | CURIB | 576.6 | 572.9 | 572.3 | -376.2 | 578.2 | 431.6 | 0.30 |
| | CO_139 | CYOTO | 585.1 | 583.5 | 583.0 | 566.0 | 586.7 | 151.5 | 0.02 |
| CO_20140219111014 | CO_98 | RAC02 | 638.0 | 636.6 | 635.7 | 628.3 | 639.4 | 117.3 | 0.36 |
| | CO_28 | CBSOL | 925.6 | 922.3 | 920.1 | 97.8 | 925.8 | 917.2 | 0.03 |
| | CO_140 | CCODA | 404.8 | 401.8 | 401.7 | 229.0 | 405.3 | 331.1 | 0.42 |
| | CO_141 | CCUFI | 1260.2 | 1256.7 | 1253.4 | -381.8 | 1260.4 | 1195.8 | 0.01 |
| | CO_65 | CFLOR | 1111.7 | 1108.3 | 1105.4 | -444.7 | 1111.9 | 1013.4 | 0.04 |
| | CO_156 | CMACA | 952.2 | 948.9 | 946.8 | -493.8 | 952.5 | 808.6 | 0.14 |
| | CO_51 | CMAN1 | 816.0 | 812.6 | 811.3 | -118.2 | 816.4 | 803.9 | 0.51 |
| | CO_122 | CNOCA | 725.8 | 722.4 | 721.2 | -109.1 | 726.1 | 714.0 | 0.04 |
| | CO_70 | CPAS1 | 1261.6 | 1258.1 | 1254.7 | -386.8 | 1261.8 | 1195.7 | 0.01 |
| | CO_03 | CROSA | 736.5 | 733.1 | 732.1 | -208.8 | 736.9 | 702.4 | 0.07 |
| | CO_151 | CSTM1 | 515.4 | 513.0 | 512.4 | 390.1 | 515.9 | 334.5 | 0.17 |
| | CO_129 | CURIB | 331.7 | 330.3 | 330.5 | 317.9 | 332.4 | 94.7 | 0.20 |
| | CO_139 | CYOTO | 964.3 | 960.9 | 958.8 | -176.3 | 964.6 | 944.4 | 0.01 |
| CO_20140221114325 | CO_28 | CBSOL | 1011.8 | 1009.8 | 1007.0 | 751.1 | 1012.2 | 673.3 | 0.03 |
| | CO_140 | CCODA | 411.6 | 409.6 | 409.6 | 309.2 | 412.5 | 270.0 | 0.29 |
| | CO_65 | CFLOR | 1329.7 | 1328.4 | 1323.5 | 1253.2 | 1329.9 | 438.7 | 0.00 |
| | CO_122 | CNOCA | 895.3 | 893.8 | 891.6 | 805.5 | 895.7 | 388.0 | 0.05 |
| | CO_03 | CROSA | 938.2 | 937.0 | 934.8 | 880.8 | 938.7 | 321.1 | 0.04 |
| | CO_129 | CURIB | 164.2 | 161.9 | 164.0 | 100.7 | 166.4 | 127.9 | 2.96 |
| | CO_139 | CYOTO | 1130.7 | 1129.2 | 1125.7 | 992.2 | 1131.1 | 537.0 | 0.00 |
| CO_20141020193321 | CO_27 | CBMAL | 368.5 | 365.5 | 365.3 | 275.5 | 368.5 | 240.1 | 0.06 |
| | CO_141 | CCUFI | 83.8 | 83.8 | 84.2 | 83.9 | 84.4 | 0.0 | 0.63 |
| | CO_65 | CFLOR | 269.6 | 268.2 | 268.1 | 256.6 | 269.6 | 78.3 | 0.17 |
| | CO_164 | CGR1C | 251.8 | 248.0 | 247.9 | 133.5 | 251.9 | 209.0 | 0.06 |
| CO_20141020193321 | CO_161 | CGUYA | 572.4 | 570.6 | 570.4 | 529.0 | 572.5 | 213.7 | 0.03 |
| | CO_50 | CIBA1 | 508.5 | 507.2 | 506.9 | 488.8 | 508.5 | 135.3 | 1.14 |
| | CO_156 | CMACA | 479.5 | 478.0 | 477.7 | 453.2 | 479.6 | 152.2 | 0.09 |
| | CO_162 | CORTC | 460.7 | 459.8 | 459.5 | 451.2 | 460.8 | 88.9 | 0.04 |
| | CO_70 | CPAS1 | 83.4 | 83.3 | 83.6 | 83.4 | 83.9 | 0.0 | 1.34 |
| | CO_71 | CPAS2 | 90.7 | 90.5 | 90.8 | 90.6 | 91.2 | 1.3 | 1.98 |
| | CO_163 | CPIZC | 472.9 | 469.7 | 469.4 | 338.3 | 472.9 | 325.7 | 0.02 |
| | CO_165 | CRECR | 548.6 | 547.0 | 546.8 | 513.5 | 548.7 | 188.4 | 0.07 |
| | CO_03 | CROSA | 606.6 | 605.7 | 605.3 | 596.0 | 606.6 | 108.0 | 0.06 |
| | CO_159 | CTAME | 929.2 | 928.8 | 927.4 | 925.6 | 929.2 | 76.3 | 0.04 |
| | CO_166 | CTUM3 | 149.5 | 145.0 | 145.0 | 2.2 | 149.7 | 145.0 | 3.20 |
| | CO_139 | CYOTO | 400.3 | 398.3 | 398.1 | 360.0 | 400.3 | 170.3 | 0.02 |
| | CO_98 | RAC02 | 330.4 | 328.6 | 328.5 | 302.1 | 330.5 | 129.4 | 0.75 |
| CO_20141128043623 | CO_60 | CARME | 506.2 | 505.7 | 506.5 | 499.7 | 509.1 | 78.7 | 0.08 |
| | CO_27 | CBMAL | 526.4 | 525.8 | 526.2 | 514.2 | 529.1 | 110.8 | 0.02 |
| | CO_28 | CBSOL | 280.1 | 279.4 | 283.3 | 273.3 | 285.1 | 59.2 | 0.24 |
| | CO_155 | CCNEG | 662.0 | 660.9 | 660.1 | 599.0 | 664.2 | 278.8 | 0.04 |
| | CO_64 | CCRUZ | 799.8 | 799.3 | 797.6 | 787.9 | 801.8 | 135.1 | 0.09 |
| | CO_141 | CCUFI | 835.7 | 835.1 | 833.2 | 814.0 | 837.7 | 186.7 | 0.01 |
| | CO_168 | CCUMB | 868.4 | 867.6 | 865.4 | 831.8 | 870.2 | 246.0 | 0.05 |
| | CO_65 | CFLOR | 820.8 | 820.7 | 818.5 | 821.0 | 822.5 | 0.4 | 0.01 |
| | CO_161 | CGUYA | 453.2 | 452.4 | 454.2 | 434.7 | 456.8 | 126.3 | 0.02 |
| | CO_50 | CIBA1 | 537.1 | 536.5 | 536.9 | 522.7 | 539.9 | 121.6 | 0.17 |
| | CO_156 | CMACA | 835.4 | 834.7 | 832.3 | 807.7 | 837.1 | 210.1 | 0.01 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20141128043623 | CO_51 | CMAN1 | 459.9 | 459.2 | 460.7 | 446.7 | 463.2 | 107.3 | 0.33 |
| | CO_88 | CMONT | 177.0 | 174.5 | 181.3 | 35.9 | 184.8 | 170.9 | 1.49 |
| | CO_122 | CNOCA | 454.5 | 453.4 | 454.7 | 411.6 | 457.7 | 190.5 | 0.06 |
| | CO_162 | CORTC | 590.5 | 590.0 | 589.8 | 580.5 | 592.9 | 106.1 | 0.02 |
| | CO_169 | CPALC | 445.9 | 445.7 | 447.1 | 445.5 | 449.1 | 21.0 | 0.10 |
| | CO_70 | CPAS1 | 840.0 | 839.4 | 837.3 | 818.7 | 841.9 | 185.1 | 0.01 |
| | CO_71 | CPAS2 | 837.8 | 837.2 | 835.1 | 818.2 | 839.7 | 177.4 | 0.01 |
| | CO_163 | CPIZC | 420.1 | 419.5 | 421.1 | 410.4 | 423.5 | 88.2 | 0.03 |
| | CO_142 | CPROV | 668.5 | 667.2 | 666.2 | -604.3 | 670.6 | 282.0 | 0.12 |
| | CO_03 | CROSA | 554.9 | 553.8 | 554.3 | 503.5 | 557.7 | 230.5 | 0.03 |
| | CO_170 | CSJAC | 281.3 | 278.8 | 282.5 | -64.8 | 286.4 | 271.2 | 0.37 |
| | CO_151 | CSTM1 | 445.1 | 442.7 | 443.8 | -177.2 | 448.3 | 405.6 | 0.18 |
| | CO_159 | CTAME | 675.5 | 673.4 | 672.4 | 396.0 | 677.6 | 544.1 | 0.03 |
| | CO_126 | CTUM2 | 781.9 | 780.8 | 778.9 | 712.0 | 783.7 | 319.7 | 0.01 |
| | CO_129 | CURIB | 682.8 | 680.3 | 679.2 | -179.5 | 684.9 | 656.1 | 0.07 |
| | CO_153 | CVALL | 500.9 | 498.3 | 498.9 | -81.9 | 503.7 | 491.6 | 0.41 |
| | CO_139 | CYOTO | 543.3 | 543.2 | 543.6 | 543.5 | 546.0 | 5.2 | 0.03 |
| CO_20150205042151 | CO_60 | CARME | 564.6 | 561.5 | 561.1 | 90.9 | 564.7 | 554.3 | 0.09 |
| | CO_27 | CBMAL | 742.0 | 738.8 | 738.0 | 26.2 | 742.0 | 738.4 | 0.01 |
| | CO_01 | CBOG1 | 453.4 | 450.3 | 450.2 | 189.7 | 453.5 | 409.2 | 0.88 |
| | CO_28 | CBSOL | 622.9 | 619.5 | 619.1 | -173.8 | 622.9 | 594.5 | 0.07 |
| | CO_42 | CCUC2 | 53.7 | 50.6 | 51.1 | 7.4 | 54.2 | 50.3 | 9.47 |
| | CO_65 | CFLOR | 835.6 | 832.6 | 831.6 | 353.8 | 835.7 | 753.7 | 0.01 |
| | CO_152 | CGIR2 | 174.2 | 171.1 | 171.2 | 42.4 | 174.4 | 166.2 | 3.43 |
| | CO_161 | CGUYA | 490.3 | 487.2 | 487.0 | 50.4 | 490.4 | 484.7 | 0.06 |
| | CO_156 | CMACA | 702.8 | 700.0 | 699.3 | 426.1 | 702.8 | 556.0 | 0.05 |
| | CO_122 | CNOCA | 423.2 | 420.1 | 419.8 | 55.1 | 423.3 | 416.7 | 0.10 |
| | CO_77 | COCAN | 130.7 | 127.4 | 127.5 | -78.2 | 130.9 | 100.5 | 7.30 |
| | CO_162 | CORTC | 591.1 | 587.9 | 587.4 | 176.0 | 591.1 | 561.4 | 0.03 |
| | CO_172 | CPAM2 | 117.2 | 114.1 | 114.6 | 42.8 | 117.6 | 106.5 | 3.87 |
| | CO_158 | CPAM3 | 112.8 | 109.7 | 110.1 | 42.9 | 113.2 | 101.7 | 3.61 |
| | CO_38 | CPAMP | 109.8 | 106.7 | 107.1 | 43.5 | 110.2 | 98.2 | 7.78 |
| | CO_163 | CPIZC | 682.0 | 678.8 | 678.2 | -59.8 | 682.0 | 676.1 | 0.03 |
| | CO_165 | CRECR | 508.7 | 505.5 | 505.4 | 75.9 | 508.8 | 500.0 | 0.11 |
| | CO_03 | CROSA | 447.4 | 444.2 | 444.1 | 155.4 | 447.5 | 416.8 | 0.11 |
| | CO_85 | CSARD | 75.4 | 72.0 | 72.2 | -27.1 | 75.8 | 66.8 | 6.52 |
| | CO_151 | CSTM1 | 398.7 | 397.3 | 397.1 | -397.1 | 398.8 | 11.2 | 0.26 |
| | CO_159 | CTAME | 203.2 | 201.3 | 201.4 | 183.5 | 203.3 | 86.8 | 2.73 |
| | CO_129 | CURIB | 386.3 | 383.3 | 383.2 | -297.7 | 386.4 | 241.3 | 0.36 |
| | CO_153 | CVALL | 281.8 | 279.9 | 279.9 | -275.2 | 281.9 | 51.2 | 1.34 |
| | CO_155 | CCNEG | 837.5 | 835.7 | 833.6 | -393.0 | 838.5 | 736.6 | 0.04 |
| | CO_205 | CGAR2 | 1098.3 | 1096.7 | 1092.9 | -644.1 | 1099.1 | 884.5 | 0.10 |
| | CO_161 | CGUYA | 782.6 | 781.1 | 779.6 | -538.5 | 783.8 | 564.5 | 0.01 |
| | CO_156 | CMACA | 1055.4 | 1053.6 | 1050.0 | -469.7 | 1056.2 | 941.4 | 0.06 |
| | CO_122 | CNOCA | 724.0 | 722.4 | 721.0 | -473.4 | 725.1 | 544.7 | 0.02 |
| | CO_77 | COCAN | 383.7 | 382.1 | 383.0 | -226.2 | 385.9 | 307.8 | 0.97 |
| | CO_162 | CORTC | 909.6 | 908.0 | 905.3 | -564.8 | 910.5 | 709.1 | 0.01 |
| | CO_165 | CRECR | 807.6 | 806.1 | 804.5 | -543.6 | 808.8 | 593.7 | 0.02 |
| | CO_151 | CSTM1 | 232.3 | 231.9 | 234.5 | -230.2 | 235.8 | 28.4 | 0.62 |
| | CO_159 | CTAME | 562.2 | 560.3 | 559.8 | -119.5 | 563.6 | 547.3 | 0.07 |
| | CO_129 | CURIB | 28.2 | 26.8 | 47.2 | 20.1 | 49.1 | 18.0 | 33.74 |
| | CO_202 | RNOR1 | 383.1 | 381.2 | 382.0 | -132.9 | 385.2 | 357.3 | 0.21 |
| | CO_204 | RNOR3 | 406.3 | 404.4 | 405.0 | -148.2 | 408.3 | 376.2 | 0.15 |
| CO_20150729001025 | CO_60 | CARME | 449.2 | 443.2 | 442.9 | -315.0 | 449.5 | 311.4 | 0.93 |
| | CO_206 | CBET2 | 649.1 | 643.4 | 642.7 | -495.3 | 649.3 | 409.8 | 0.03 |
| | CO_27 | CBMAL | 471.1 | 466.9 | 466.6 | -438.5 | 471.3 | 160.2 | 0.05 |
| | CO_01 | CBOG1 | 537.0 | 530.2 | 529.9 | -242.5 | 537.3 | 471.3 | 1.23 |
| | CO_28 | CBSOL | 225.1 | 221.2 | 221.4 | -211.6 | 225.7 | 64.5 | 2.14 |
| | CO_155 | CCNEG | 609.5 | 602.8 | 602.2 | -281.5 | 609.7 | 532.6 | 0.21 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20150729001025 | CO_64 | CCRUZ | 743.8 | 739.3 | 738.5 | -676.8 | 744.0 | 296.6 | 0.14 |
| | CO_121 | CCUC3 | 531.2 | 524.6 | 524.1 | 155.5 | 531.4 | 501.8 | 0.55 |
| | CO_141 | CCUFI | 780.5 | 776.4 | 775.6 | -727.8 | 780.8 | 269.1 | 0.02 |
| | CO_168 | CCUMB | 814.3 | 810.5 | 809.6 | -776.7 | 814.5 | 230.7 | 0.04 |
| | CO_205 | CGAR2 | 703.3 | 697.7 | 696.9 | -553.7 | 703.5 | 423.4 | 0.04 |
| | CO_161 | CGUYA | 397.8 | 391.3 | 391.3 | -234.5 | 398.3 | 313.2 | 0.18 |
| | CO_50 | CIBA1 | 480.9 | 474.6 | 474.3 | -309.2 | 481.2 | 359.7 | 0.34 |
| | CO_156 | CMACA | 779.4 | 773.0 | 772.0 | -491.3 | 779.5 | 595.6 | 0.03 |
| | CO_51 | CMAN1 | 403.8 | 397.4 | 397.3 | -255.3 | 404.2 | 304.5 | 1.13 |
| | CO_88 | CMONT | 172.4 | 167.0 | 167.7 | 117.7 | 173.1 | 121.1 | 1.48 |
| | CO_207 | CNIZA | 408.8 | 402.4 | 402.3 | -255.4 | 409.2 | 310.8 | 0.14 |
| | CO_122 | CNOCA | 402.2 | 395.5 | 395.2 | -178.8 | 402.6 | 352.6 | 0.19 |
| | CO_77 | COCAN | 439.5 | 433.0 | 432.8 | 160.6 | 439.8 | 403.2 | 1.27 |
| | CO_162 | CORTC | 533.7 | 527.6 | 527.1 | -365.4 | 534.0 | 380.2 | 0.05 |
| | CO_169 | CPALC | 388.5 | 382.9 | 382.7 | -303.7 | 388.8 | 233.0 | 0.26 |
| | CO_172 | CPAM2 | 518.2 | 511.6 | 511.3 | 92.6 | 518.6 | 503.6 | 0.36 |
| | CO_70 | CPAS1 | 784.7 | 780.6 | 779.7 | -730.8 | 785.0 | 273.1 | 0.01 |
| | CO_71 | CPAS2 | 782.4 | 778.2 | 777.3 | -726.0 | 782.7 | 279.1 | 0.01 |
| | CO_209 | CPBER | 367.8 | 361.0 | 360.8 | -61.1 | 368.2 | 355.8 | 0.03 |
| | CO_163 | CPIZC | 364.9 | 360.8 | 360.7 | -340.5 | 365.3 | 119.3 | 0.31 |
| | CO_142 | CPROV | 721.7 | 715.7 | 714.5 | 379.2 | 721.9 | 608.1 | 0.07 |
| | CO_208 | CPTAR | 133.8 | 131.7 | 132.1 | -131.7 | 134.8 | 0.5 | 48.01 |
| | CO_124 | CREAC | 537.0 | 530.2 | 529.9 | -243.5 | 537.3 | 470.8 | 0.53 |
| | CO_165 | CRECR | 424.8 | 418.4 | 418.4 | -260.8 | 425.3 | 327.0 | 0.28 |
| | CO_03 | CROSA | 502.3 | 495.6 | 495.3 | -231.1 | 502.7 | 438.2 | 0.19 |
| | CO_151 | CSTM1 | 468.9 | 465.4 | 464.9 | 426.9 | 469.1 | 191.2 | 0.15 |
| | CO_126 | CTUM2 | 731.1 | 728.2 | 727.2 | -720.9 | 731.3 | 102.0 | 0.02 |
| | CO_129 | CURIB | 697.9 | 693.4 | 692.3 | 572.1 | 698.1 | 394.9 | 0.11 |
| | CO_153 | CVALL | 511.1 | 506.3 | 505.8 | 397.9 | 511.4 | 316.3 | 0.42 |
| | CO_139 | CYOTO | 486.0 | 480.7 | 480.4 | -401.9 | 486.3 | 263.4 | 0.04 |
| | CO_98 | RAC02 | 548.9 | 543.9 | 543.4 | -472.7 | 549.2 | 268.6 | 0.43 |
| CO_20150907055117 | CO_210 | CCAPU | 52.5 | 50.5 | 52.3 | -37.7 | 54.6 | 33.5 | 14.68 |
| | CO_155 | CCNEG | 678.5 | 677.2 | 676.4 | -670.4 | 678.7 | 95.8 | 0.02 |
| | CO_161 | CGUYA | 464.1 | 462.6 | 462.5 | -447.0 | 464.5 | 119.1 | 0.01 |
| | CO_207 | CNIZA | 474.0 | 472.5 | 472.2 | -451.3 | 474.3 | 139.7 | 0.01 |
| | CO_122 | CNOCA | 471.5 | 470.3 | 470.0 | -467.2 | 471.8 | 53.9 | 0.01 |
| | CO_77 | COCAN | 498.6 | 496.6 | 496.3 | -409.7 | 498.8 | 280.3 | 0.20 |
| | CO_209 | CPBER | 438.3 | 437.1 | 436.8 | -433.6 | 438.6 | 54.8 | 0.03 |
| | CO_208 | CPTAR | 163.3 | 161.2 | 161.6 | -104.3 | 164.0 | 122.9 | 7.34 |
| | CO_129 | CURIB | 725.8 | 723.6 | 722.5 | -273.9 | 725.9 | 669.3 | 0.02 |
| | CO_153 | CVALL | 544.4 | 542.2 | 541.6 | -253.4 | 544.6 | 479.1 | 0.06 |
| CO_20151012043541 | CO_60 | CARME | 387.7 | 385.5 | 385.4 | 109.1 | 387.9 | 370.3 | 0.23 |
| | CO_211 | CBARI | 484.7 | 483.2 | 482.9 | 431.8 | 484.8 | 220.3 | 0.07 |
| | CO_206 | CBET2 | 582.2 | 580.0 | 579.5 | 82.8 | 582.3 | 574.3 | 0.01 |
| | CO_28 | CBSOL | 146.8 | 144.5 | 144.8 | -29.9 | 147.2 | 141.4 | 2.09 |
| | CO_210 | CCAPU | 123.1 | 121.0 | 121.4 | 44.5 | 123.6 | 113.2 | 1.28 |
| | CO_155 | CCNEG | 565.6 | 563.6 | 563.1 | 307.4 | 565.7 | 473.2 | 0.05 |
| | CO_64 | CCRUZ | 667.0 | 664.7 | 664.1 | -114.9 | 667.1 | 654.6 | 0.08 |
| | CO_141 | CCUFI | 702.4 | 700.1 | 699.6 | -167.0 | 702.6 | 679.8 | 0.01 |
| | CO_65 | CFLOR | 692.6 | 690.5 | 689.7 | 25.1 | 692.7 | 690.1 | 0.01 |
| | CO_205 | CGAR2 | 634.5 | 632.4 | 631.8 | 59.5 | 634.6 | 629.7 | 0.02 |
| | CO_161 | CGUYA | 345.7 | 343.6 | 343.6 | 157.8 | 346.0 | 306.1 | 0.07 |
| | CO_50 | CIBA1 | 423.7 | 421.5 | 421.3 | 151.5 | 423.9 | 394.0 | 0.14 |
| | CO_156 | CMACA | 721.9 | 719.7 | 718.8 | 235.0 | 721.9 | 680.6 | 0.01 |
| | CO_51 | CMAN1 | 348.1 | 346.0 | 346.0 | 138.6 | 348.4 | 317.8 | 0.50 |
| | CO_207 | CNIZA | 353.7 | 351.5 | 351.5 | 143.6 | 353.9 | 321.6 | 0.04 |
| | CO_122 | CNOCA | 361.8 | 359.8 | 359.6 | 222.4 | 361.9 | 284.1 | 0.04 |
| | CO_77 | COCAN | 463.4 | 462.7 | 462.4 | 462.9 | 463.6 | 39.1 | 0.14 |
| | CO_162 | CORTC | 473.0 | 470.8 | 470.5 | 135.1 | 473.1 | 451.5 | 0.02 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20151012043541 | CO_172 | CPAM2 | 526.3 | 525.1 | 524.9 | 504.1 | 526.5 | 153.0 | 0.03 |
| | CO_70 | CPAS1 | 706.7 | 704.4 | 703.8 | -165.5 | 706.9 | 684.5 | 0.01 |
| | CO_71 | CPAS2 | 704.6 | 702.3 | 701.6 | -157.8 | 704.7 | 684.2 | 0.01 |
| | CO_163 | CPIZC | 286.9 | 284.6 | 284.5 | -61.2 | 287.1 | 277.9 | 0.13 |
| | CO_208 | CPTAR | 57.8 | 55.5 | 56.4 | -46.3 | 58.8 | 30.7 | 50.38 |
| | CO_03 | CROSA | 459.4 | 457.4 | 457.2 | 260.8 | 459.6 | 376.8 | 0.04 |
| | CO_151 | CSTM1 | 537.3 | 535.7 | 535.2 | 447.7 | 537.4 | 296.4 | 0.07 |
| | CO_153 | CVALL | 567.9 | 566.6 | 566.1 | 532.1 | 568.0 | 199.5 | 0.02 |
| CO_20151128105911 | CO_155 | CCNEG | 281.1 | 280.1 | 280.2 | -246.0 | 281.6 | 133.8 | 1.72 |
| | CO_64 | CCRUZ | 692.2 | 690.6 | 689.8 | -389.0 | 692.5 | 570.0 | 0.17 |
| | CO_141 | CCUFI | 747.3 | 745.6 | 744.8 | -404.2 | 747.5 | 625.7 | 0.02 |
| | CO_205 | CGAR2 | 516.1 | 514.5 | 514.1 | -292.8 | 516.4 | 422.8 | 0.56 |
| | CO_161 | CGUYA | 490.2 | 489.5 | 489.3 | -470.6 | 490.6 | 134.7 | 0.04 |
| | CO_50 | CIBA1 | 455.2 | 454.2 | 453.9 | -408.8 | 455.5 | 197.7 | 0.60 |
| | CO_156 | CMACA | 355.1 | 353.4 | 353.2 | -138.4 | 355.5 | 325.1 | 0.63 |
| | CO_207 | CNIZA | 494.3 | 493.6 | 493.2 | -468.3 | 494.7 | 155.6 | 0.04 |
| | CO_122 | CNOCA | 450.3 | 449.9 | 449.5 | -444.1 | 450.7 | 71.9 | 0.07 |
| | CO_77 | COCAN | 539.0 | 537.9 | 537.4 | -466.9 | 539.3 | 266.7 | 0.12 |
| | CO_162 | CORTC | 452.3 | 451.2 | 450.8 | -376.6 | 452.6 | 248.2 | 0.35 |
| | CO_172 | CPAM2 | 419.3 | 418.2 | 418.2 | -354.5 | 419.8 | 221.7 | 0.09 |
| | CO_70 | CPAS1 | 746.5 | 744.9 | 743.9 | -399.7 | 746.8 | 627.7 | 0.02 |
| | CO_71 | CPAS2 | 738.9 | 737.2 | 736.3 | -394.9 | 739.1 | 621.7 | 0.05 |
| | CO_209 | CPBER | 468.4 | 468.0 | 467.6 | -466.3 | 468.7 | 40.1 | 0.04 |
| | CO_165 | CRECR | 478.9 | 478.1 | 478.0 | -451.4 | 479.4 | 157.5 | 0.19 |
| | CO_03 | CROSA | 365.3 | 364.6 | 364.7 | -349.2 | 365.8 | 104.7 | 0.19 |
| | CO_84 | CSJGU | 220.3 | 218.5 | 218.8 | -50.2 | 221.0 | 212.6 | 4.26 |
| | CO_159 | CTAME | 291.3 | 290.0 | 290.0 | -215.1 | 291.8 | 194.4 | 0.66 |
| | CO_139 | CYOTO | 574.3 | 573.2 | 572.6 | -482.5 | 574.6 | 308.8 | 0.02 |
| CO_20151229025406 | CO_211 | CBARI | 388.8 | 388.4 | 388.3 | 389.6 | 388.9 | 0.0 | 0.19 |
| | CO_206 | CBET2 | 481.2 | 478.7 | 478.4 | 174.1 | 481.3 | 446.3 | 0.05 |
| | CO_28 | CBSOL | 105.8 | 103.4 | 103.5 | -72.8 | 106.1 | 73.4 | 2.60 |
| | CO_210 | CCAPU | 211.7 | 209.1 | 209.1 | -86.2 | 211.9 | 190.5 | 0.37 |
| | CO_155 | CCNEG | 451.1 | 449.3 | 449.0 | 354.0 | 451.2 | 278.0 | 0.13 |
| | CO_64 | CCRUZ | 589.2 | 586.7 | 586.3 | 13.1 | 589.3 | 586.6 | 0.10 |
| | CO_168 | CCUMB | 670.0 | 667.4 | 667.0 | -78.9 | 670.1 | 662.7 | 0.06 |
| | CO_65 | CFLOR | 597.9 | 595.4 | 594.9 | 157.0 | 598.0 | 574.5 | 0.02 |
| | CO_205 | CGAR2 | 536.3 | 533.8 | 533.5 | 170.0 | 536.4 | 506.3 | 0.10 |
| | CO_161 | CGUYA | 232.3 | 230.1 | 230.3 | 158.1 | 232.5 | 168.4 | 0.25 |
| | CO_50 | CIBA1 | 313.0 | 310.7 | 310.6 | 180.7 | 313.1 | 253.6 | 0.50 |
| | CO_156 | CMACA | 611.7 | 609.4 | 608.9 | 352.7 | 611.7 | 497.4 | 0.02 |
| | CO_51 | CMAN1 | 236.3 | 234.1 | 234.2 | 143.7 | 236.5 | 185.7 | 1.74 |
| | CO_207 | CNIZA | 241.6 | 239.4 | 239.5 | 149.8 | 241.8 | 187.7 | 0.21 |
| | CO_122 | CNOCA | 247.7 | 246.1 | 246.1 | 212.2 | 247.8 | 126.7 | 0.23 |
| | CO_77 | COCAN | 402.1 | 400.6 | 400.5 | 360.2 | 402.2 | 177.7 | 0.25 |
| | CO_162 | CORTC | 365.0 | 362.7 | 362.5 | 183.8 | 365.1 | 313.3 | 0.13 |
| | CO_169 | CPALC | 221.9 | 219.3 | 219.4 | 61.2 | 222.0 | 211.0 | 2.58 |
| | CO_172 | CPAM2 | 443.7 | 442.9 | 442.8 | 436.2 | 443.8 | 83.2 | 0.04 |
| | CO_209 | CPBER | 249.5 | 248.9 | 248.9 | 249.7 | 249.6 | 15.1 | 0.27 |
| | CO_163 | CPIZC | 223.2 | 220.6 | 220.5 | -58.2 | 223.4 | 212.7 | 0.21 |
| | CO_208 | CPTAR | 127.2 | 125.9 | 126.0 | -124.2 | 127.5 | 20.9 | 15.78 |
| | CO_165 | CRECR | 258.0 | 255.8 | 256.0 | 163.6 | 258.2 | 197.6 | 0.52 |
| | CO_03 | CROSA | 344.9 | 343.1 | 343.1 | 278.5 | 345.0 | 202.0 | 0.14 |
| | CO_151 | CSTM1 | 550.0 | 547.5 | 547.1 | 235.9 | 550.0 | 494.5 | 0.09 |
| | CO_159 | CTAME | 543.4 | 543.0 | 542.5 | 544.2 | 543.4 | 4.1 | 0.03 |
| | CO_129 | CURIB | 745.4 | 743.3 | 742.4 | 473.4 | 745.5 | 572.9 | 0.10 |
| | CO_153 | CVALL | 554.2 | 552.0 | 551.5 | 347.0 | 554.2 | 429.9 | 0.05 |
| | CO_139 | CYOTO | 322.1 | 319.6 | 319.5 | 61.6 | 322.3 | 313.8 | 0.49 |
| | CO_98 | RAC02 | 388.2 | 385.7 | 385.5 | 45.9 | 388.3 | 383.1 | 0.86 |

(.../...)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20160411092928 | CO_211 | CBARI | 380.4 | 379.6 | 379.8 | 379.6 | 381.3 | 36.0 | 0.20 |
| | CO_206 | CBET2 | 496.3 | 493.4 | 493.0 | 236.7 | 496.9 | 433.7 | 0.03 |
| | CO_28 | CBSOL | 126.1 | 122.9 | 124.8 | -65.5 | 128.5 | 104.0 | 1.02 |
| | CO_64 | CCRUZ | 608.4 | 605.3 | 604.7 | 99.4 | 609.1 | 597.4 | 0.07 |
| | CO_168 | CCUMB | 690.3 | 687.2 | 686.3 | 20.4 | 690.9 | 687.0 | 0.02 |
| | CO_205 | CGAR2 | 552.0 | 549.0 | 548.5 | 242.0 | 552.7 | 493.5 | 0.04 |
| | CO_161 | CGUYA | 241.3 | 238.8 | 240.1 | 177.5 | 242.9 | 161.7 | 0.21 |
| | CO_122 | CNOCA | 251.1 | 249.2 | 250.1 | 224.3 | 252.3 | 112.1 | 0.15 |
| | CO_77 | COCAN | 385.7 | 383.6 | 383.7 | 322.2 | 386.5 | 210.6 | 0.26 |
| | CO_162 | CORTC | 377.7 | 375.0 | 375.1 | 225.5 | 378.5 | 300.8 | 0.07 |
| | CO_169 | CPALC | 238.5 | 235.4 | 236.4 | 88.4 | 239.8 | 218.9 | 1.38 |
| | CO_172 | CPAM2 | 431.6 | 430.1 | 430.3 | 412.0 | 432.5 | 129.1 | 0.06 |
| | CO_209 | CPBER | 242.8 | 242.2 | 243.1 | 244.0 | 244.0 | 0.0 | 0.19 |
| | CO_163 | CPIZC | 244.3 | 241.1 | 241.7 | -29.3 | 245.5 | 239.3 | 0.08 |
| | CO_208 | CPTAR | 134.0 | 132.5 | 134.2 | -131.8 | 136.3 | 13.8 | 6.80 |
| | CO_159 | CTAME | 535.0 | 534.2 | 533.6 | 533.1 | 535.6 | 54.8 | 0.04 |
| | CO_126 | CTUM2 | 624.8 | 621.6 | 620.7 | -99.3 | 625.3 | 613.6 | 0.01 |
| | CO_129 | CURIB | 724.8 | 722.0 | 720.6 | 372.2 | 725.3 | 618.9 | 0.01 |
| | CO_139 | CYOTO | 339.7 | 336.6 | 337.0 | 104.8 | 340.7 | 320.4 | 0.29 |
| CO_20160914015832 | CO_211 | CBARI | 342.0 | 334.5 | 334.7 | -102.4 | 342.8 | 318.5 | 1.61 |
| | CO_206 | CBET2 | 520.9 | 515.4 | 514.9 | 393.7 | 521.4 | 337.8 | 0.07 |
| | CO_27 | CBMAL | 391.8 | 388.8 | 388.8 | 385.0 | 392.3 | 81.7 | 0.16 |
| | CO_28 | CBSOL | 183.3 | 180.2 | 181.3 | 180.3 | 184.5 | 41.6 | 3.49 |
| | CO_155 | CCNEG | 453.0 | 446.2 | 446.0 | 160.8 | 453.6 | 417.9 | 0.61 |
| | CO_64 | CCRUZ | 647.9 | 643.8 | 643.0 | 593.1 | 648.4 | 260.9 | 0.55 |
| | CO_168 | CCUMB | 734.7 | 731.3 | 730.3 | 703.6 | 735.2 | 215.1 | 0.03 |
| | CO_65 | CFLOR | 643.3 | 638.0 | 637.1 | 514.8 | 643.6 | 382.6 | 0.06 |
| | CO_205 | CGAR2 | 578.5 | 573.1 | 572.5 | 448.5 | 579.0 | 362.2 | 0.08 |
| | CO_164 | CGR1C | 530.1 | 527.8 | 527.2 | 529.1 | 530.6 | 62.0 | 0.01 |
| | CO_161 | CGUYA | 251.7 | 245.4 | 246.4 | 155.9 | 252.9 | 193.4 | 0.55 |
| | CO_156 | CMACA | 633.5 | 627.0 | 626.1 | 354.9 | 633.8 | 519.7 | 0.08 |
| | CO_207 | CNIZA | 266.2 | 260.1 | 260.9 | 176.9 | 267.2 | 195.1 | 0.45 |
| | CO_122 | CNOCA | 245.7 | 238.9 | 239.6 | 93.8 | 246.6 | 221.7 | 0.77 |
| | CO_77 | COCAN | 331.1 | 324.1 | 324.3 | -249.0 | 331.9 | 207.5 | 1.83 |
| | CO_169 | CPALC | 271.3 | 266.7 | 267.2 | 239.0 | 272.2 | 127.8 | 1.46 |
| | CO_172 | CPAM2 | 384.5 | 377.0 | 377.1 | -201.1 | 385.3 | 318.8 | 0.52 |
| | CO_209 | CPBER | 210.9 | 203.8 | 204.3 | -22.4 | 212.0 | 202.6 | 2.07 |
| | CO_142 | CPROV | 877.7 | 870.2 | 868.5 | -270.7 | 877.9 | 826.5 | 0.04 |
| | CO_03 | CROSA | 346.0 | 339.2 | 339.6 | 129.1 | 346.9 | 315.6 | 0.57 |
| | CO_151 | CSTM1 | 476.2 | 472.2 | 471.8 | -470.7 | 476.7 | 37.1 | 0.05 |
| | CO_159 | CTAME | 495.6 | 488.1 | 487.7 | -170.1 | 496.1 | 457.5 | 0.23 |
| | CO_126 | CTUM2 | 675.2 | 672.9 | 671.8 | 673.3 | 675.6 | 78.2 | 0.03 |
| | CO_129 | CURIB | 668.0 | 663.3 | 662.4 | -651.9 | 668.3 | 122.6 | 0.05 |
| | CO_213 | CURR1 | 74.7 | 68.2 | 70.4 | -58.4 | 77.7 | 35.2 | 11.17 |
| | CO_139 | CYOTO | 374.1 | 369.6 | 369.6 | 329.6 | 374.8 | 176.3 | 0.09 |
| | CO_98 | RAC02 | 443.3 | 438.9 | 438.7 | 398.1 | 443.8 | 194.8 | 0.52 |
| CO_20161031002012 | CO_39 | CANAP | 121.3 | 117.2 | 122.6 | 67.9 | 126.5 | 97.4 | 16.72 |
| | CO_206 | CBET2 | 129.6 | 125.2 | 130.2 | 41.5 | 134.5 | 119.1 | 6.44 |
| | CO_01 | CBOG1 | 140.0 | 135.6 | 140.4 | 33.1 | 145.0 | 132.1 | 5.16 |
| | CO_155 | CCNEG | 116.5 | 111.8 | 116.6 | -35.0 | 122.1 | 106.2 | 27.46 |
| | CO_64 | CCRUZ | 342.9 | 338.6 | 339.9 | 114.7 | 345.0 | 319.5 | 2.45 |
| | CO_183 | CDABE | 438.0 | 435.0 | 435.3 | 374.5 | 439.5 | 225.6 | 0.04 |
| | CO_65 | CFLOR | 244.0 | 239.6 | 241.3 | -5.5 | 246.6 | 239.6 | 3.97 |
| | CO_205 | CGAR2 | 178.4 | 174.0 | 177.3 | 16.1 | 182.3 | 173.5 | 18.49 |
| | CO_164 | CGR1C | 408.7 | 405.3 | 405.7 | 314.8 | 410.2 | 258.4 | 0.02 |
| | CO_161 | CGUYA | 218.8 | 215.9 | 219.0 | 189.6 | 222.2 | 108.1 | 0.58 |
| | CO_50 | CIBA1 | 135.8 | 133.6 | 138.4 | 128.7 | 140.7 | 44.3 | 16.29 |
| | CO_162 | CORTC | 95.3 | 94.5 | 101.2 | 97.2 | 101.8 | 0.0 | 16.72 |

(.../...)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20170206130245 | CO_214 | APAC | 536.3 | 533.6 | 533.4 | 466.0 | 537.8 | 264.6 | 1.69 |
| | CO_160 | CARIG | 713.0 | 709.3 | 707.8 | 391.1 | 714.1 | 592.8 | 0.04 |
| | CO_211 | CBARI | 385.9 | 381.9 | 383.1 | 79.0 | 388.1 | 374.2 | 0.53 |
| | CO_206 | CBET2 | 115.7 | 111.7 | 118.3 | 17.7 | 122.6 | 110.7 | 14.85 |
| | CO_01 | CBOG1 | 147.4 | 143.4 | 149.1 | 27.5 | 153.3 | 141.3 | 5.41 |
| | CO_64 | CCRUZ | 328.3 | 324.3 | 326.3 | 76.7 | 331.1 | 315.8 | 3.39 |
| | CO_168 | CCUMB | 447.5 | 443.5 | 444.3 | 112.5 | 449.6 | 429.7 | 0.37 |
| | CO_183 | CDABE | 430.1 | 427.4 | 428.0 | 374.6 | 432.0 | 210.7 | 0.06 |
| | CO_65 | CFLOR | 234.9 | 230.7 | 233.2 | -37.6 | 238.3 | 227.6 | 2.63 |
| | CO_205 | CGAR2 | 167.7 | 163.7 | 168.0 | -11.5 | 172.8 | 163.3 | 22.10 |
| | CO_164 | CGR1C | 390.0 | 386.7 | 387.5 | 280.5 | 392.0 | 268.9 | 0.05 |
| | CO_156 | CMACA | 173.3 | 170.1 | 173.9 | -160.3 | 177.9 | 57.0 | 21.76 |
| | CO_207 | CNIZA | 197.9 | 195.4 | 199.4 | 178.5 | 202.3 | 85.5 | 0.46 |
| | CO_162 | CORTC | 79.8 | 78.9 | 88.8 | 81.8 | 89.4 | 0.0 | 35.51 |
| | CO_169 | CPALC | 239.3 | 238.1 | 240.9 | 240.3 | 242.7 | 18.0 | 1.29 |
| | CO_172 | CPAM2 | 483.9 | 480.0 | 480.5 | 86.7 | 485.9 | 472.6 | 0.08 |
| | CO_209 | CPBER | 343.3 | 339.6 | 340.9 | 187.8 | 345.7 | 284.7 | 0.37 |
| | CO_163 | CPIZC | 340.6 | 339.3 | 340.6 | 339.7 | 342.9 | 40.5 | 0.29 |
| | CO_170 | CSJAC | 717.8 | 714.3 | 712.9 | 475.6 | 718.9 | 534.5 | 0.03 |
| | CO_159 | CTAME | 460.5 | 456.4 | 456.6 | -54.0 | 462.3 | 453.2 | 0.23 |
| | CO_126 | CTUM2 | 484.5 | 480.7 | 480.8 | 251.7 | 486.2 | 411.2 | 0.15 |
| | CO_166 | CTUM3 | 486.2 | 482.5 | 482.5 | 252.9 | 487.9 | 412.4 | 5.16 |
| | CO_129 | CURIB | 963.1 | 959.2 | 956.1 | 318.0 | 963.9 | 905.2 | 0.01 |
| | CO_139 | CYOTO | 193.2 | 191.1 | 195.0 | 184.2 | 197.5 | 60.5 | 1.05 |
| | CO_215 | MEDEC | 328.7 | 325.8 | 327.5 | 270.3 | 331.3 | 185.9 | 1.04 |
| | CO_98 | RAC02 | 205.1 | 202.0 | 205.6 | 159.8 | 209.1 | 127.1 | 5.14 |
| CO_20170418174956 | CO_214 | APAC | 1189.8 | 1182.4 | 1179.5 | -477.9 | 1189.9 | 1079.5 | 0.93 |
| | CO_216 | ARGC | 1403.3 | 1396.2 | 1391.9 | -294.7 | 1403.4 | 1363.7 | 0.03 |
| | CO_217 | BET | 605.5 | 598.2 | 597.5 | -188.6 | 605.8 | 567.5 | 0.95 |
| | CO_218 | BOG | 829.3 | 822.3 | 821.2 | -108.7 | 829.5 | 815.0 | 2.97 |
| | CO_219 | CRU | 512.0 | 504.8 | 504.5 | -314.3 | 512.4 | 394.7 | 12.08 |
| | CO_220 | CUFI | 495.5 | 488.5 | 488.3 | -345.0 | 496.0 | 345.5 | 1.85 |
| | CO_221 | CUM | 496.1 | 489.4 | 489.2 | -386.8 | 496.6 | 299.5 | 2.64 |
| | CO_222 | DBB | 1087.7 | 1080.4 | 1078.1 | -410.7 | 1087.9 | 997.9 | 0.03 |
| | CO_223 | FLO2 | 480.4 | 473.0 | 472.6 | -176.7 | 480.7 | 438.7 | 3.26 |
| | CO_224 | GARC | 546.3 | 538.9 | 538.5 | -179.3 | 546.6 | 508.1 | 12.01 |
| | CO_226 | MAL | 782.6 | 775.2 | 774.0 | -433.4 | 782.8 | 641.7 | 2.38 |
| | CO_227 | NOR | 922.3 | 915.1 | 913.5 | -222.2 | 922.5 | 887.4 | 0.11 |
| | CO_228 | PAL | 855.4 | 848.0 | 846.6 | -350.9 | 855.6 | 771.2 | 0.15 |
| | CO_229 | PAS1 | 490.7 | 483.7 | 483.5 | -341.4 | 491.1 | 342.3 | 8.33 |
| | CO_230 | PAS2 | 490.3 | 483.2 | 482.9 | -334.9 | 490.7 | 348.0 | 8.37 |
| | CO_231 | PIZC | 885.5 | 878.1 | 876.6 | -467.0 | 885.6 | 742.3 | 0.11 |
| | CO_232 | RECRC | 854.1 | 846.8 | 845.7 | -254.0 | 854.4 | 807.4 | 0.27 |
| | CO_233 | TUM | 634.6 | 628.0 | 627.2 | -511.3 | 634.8 | 363.8 | 0.43 |

## Resultados para eventos del nido Sísmico de Bucaramanga

**Tabla I. 2** Variables geométricas para cada registro de eventos provenientes del Nido de Bucaramanga

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19941210152420 | CO_10 | CNORC | 247.8 | 244.0 | 290.2 | -55.3 | 296.9 | 237.6 | 8.66 |
| | CO_04 | CVHER | 304.7 | 301.0 | 339.2 | -33.3 | 346.6 | 299.2 | 2.29 |
| | CO_11 | CVIL1 | 294.4 | 290.9 | 330.8 | 150.1 | 336.7 | 250.7 | 1.24 |
| CO_19950520221900 | CO_13 | CGUAD | 99.4 | 96.5 | 176.0 | -64.2 | 180.3 | 72.0 | 2.84 |
| | CO_10 | CNORC | 117.3 | 116.2 | 186.8 | -112.2 | 190.4 | 30.4 | 23.23 |
| | CO_02 | CPENS | 149.8 | 148.1 | 208.8 | -135.7 | 213.0 | 59.3 | 9.12 |
| | CO_19 | CPLA1 | 152.2 | 151.2 | 210.2 | -146.9 | 214.0 | 35.5 | 24.66 |
| | CO_04 | CVHER | 154.4 | 151.9 | 211.4 | -118.2 | 216.3 | 95.4 | 3.67 |
| | CO_11 | CVIL1 | 149.2 | 145.9 | 206.1 | 68.5 | 211.5 | 128.8 | 3.66 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19970101043553 | CO_39 | CANAP | 298.2 | 297.4 | 336.4 | 300.0 | 340.1 | 0.0 | 2.83 |
| | CO_05 | CANDE | 347.4 | 344.6 | 378.1 | 289.1 | 384.3 | 191.4 | 1.51 |
| | CO_06 | CANSE | 356.9 | 354.4 | 387.1 | 320.0 | 393.1 | 157.7 | 1.08 |
| | CO_01 | CBOG1 | 264.1 | 262.8 | 308.2 | 263.6 | 311.6 | 30.4 | 2.03 |
| | CO_29 | CBUC1 | 40.8 | 36.6 | 165.9 | -20.5 | 169.0 | 30.2 | 6.97 |
| | CO_40 | CBUIS | 49.9 | 45.6 | 168.1 | -23.9 | 171.4 | 38.8 | 12.92 |
| | CO_12 | CCHIN | 254.5 | 252.7 | 300.0 | 245.7 | 303.7 | 68.8 | 1.20 |
| | CO_41 | CCUC1 | 136.5 | 133.7 | 208.4 | -129.7 | 212.8 | 32.6 | 4.72 |
| | CO_42 | CCUC2 | 139.4 | 136.7 | 210.2 | -132.9 | 214.7 | 31.9 | 10.46 |
| | CO_13 | CGUAD | 259.6 | 258.3 | 303.6 | 258.5 | 307.1 | 35.1 | 4.46 |
| | CO_43 | CHATO | 144.1 | 139.9 | 212.2 | -25.8 | 217.7 | 137.5 | 1.68 |
| | CO_44 | CMAZP | 372.4 | 370.5 | 401.2 | 354.7 | 407.1 | 115.0 | 1.39 |
| | CO_10 | CNORC | 249.2 | 247.0 | 294.0 | 231.6 | 298.1 | 92.6 | 14.05 |
| | CO_38 | CPAMP | 79.8 | 77.3 | 180.3 | -76.5 | 183.6 | 11.3 | 3.26 |
| | CO_02 | CPENS | 286.6 | 284.3 | 326.1 | 265.9 | 330.7 | 107.3 | 14.73 |
| | CO_19 | CPLA1 | 225.9 | 222.7 | 274.6 | 170.6 | 279.1 | 146.1 | 22.95 |
| | CO_03 | CROSA | 259.1 | 258.3 | 304.7 | 260.9 | 307.7 | 0.0 | 2.06 |
| | CO_45 | CSLUI | 235.1 | 232.2 | 282.0 | 196.9 | 286.2 | 127.2 | 17.33 |
| | CO_46 | CSONS | 288.5 | 285.9 | 327.4 | 251.0 | 332.5 | 141.3 | 5.19 |
| | CO_47 | CSUES | 112.5 | 109.6 | 197.3 | 93.8 | 200.1 | 60.8 | 8.03 |
| | CO_48 | CSVIC | 260.8 | 257.5 | 303.7 | 187.4 | 308.8 | 179.2 | 3.65 |
| CO_19990318235411 | CO_29 | CBUC1 | 331.0 | 327.5 | 332.5 | -57.0 | 338.0 | 322.5 | 0.64 |
| | CO_41 | CCUC1 | 261.8 | 258.2 | 265.1 | -116.0 | 270.3 | 230.6 | 3.21 |
| | CO_77 | COCAN | 198.9 | 195.4 | 205.5 | -25.3 | 210.3 | 193.8 | 7.72 |
| | CO_85 | CSARD | 231.6 | 228.0 | 236.1 | -83.8 | 241.3 | 212.0 | 2.92 |
| CO_19991108055121 | CO_39 | CANAP | 298.1 | 293.6 | 332.8 | 88.0 | 340.0 | 281.1 | 3.09 |
| | CO_01 | CBOG1 | 262.9 | 258.5 | 304.4 | 108.2 | 310.7 | 236.3 | 3.70 |
| | CO_235 | CBOG1_R | 262.9 | 258.5 | 304.4 | 108.2 | 310.7 | 236.3 | 0.95 |
| | CO_61 | CBOG2 | 265.7 | 261.3 | 306.8 | 113.1 | 313.1 | 237.1 | 3.44 |
| | CO_29 | CBUC1 | 47.9 | 44.9 | 168.1 | -44.8 | 170.9 | 4.0 | 5.32 |
| | CO_75 | CBUC3 | 50.3 | 47.8 | 168.6 | -47.8 | 171.3 | 0.0 | 10.82 |
| | CO_76 | CBUC4 | 52.3 | 49.8 | 169.1 | -49.8 | 171.8 | 0.0 | 11.65 |
| | CO_86 | CBUC5 | 40.4 | 37.8 | 166.3 | -37.8 | 168.9 | 0.0 | 16.78 |
| | CO_87 | CBUC6 | 49.3 | 46.6 | 168.4 | -46.6 | 171.1 | 1.1 | 4.42 |
| | CO_40 | CBUIS | 57.1 | 54.2 | 170.7 | -54.0 | 173.7 | 4.6 | 11.47 |
| | CO_07 | CFILA | 334.5 | 329.8 | 364.0 | -48.0 | 372.8 | 326.3 | 0.60 |
| | CO_50 | CIBA1 | 360.0 | 355.5 | 387.1 | 50.0 | 395.7 | 352.4 | 1.58 |
| | CO_67 | CIBA2 | 359.4 | 354.9 | 386.1 | 46.0 | 394.7 | 352.3 | 0.86 |
| | CO_51 | CMAN1 | 342.2 | 337.6 | 371.2 | -25.7 | 380.0 | 336.6 | 6.50 |
| | CO_77 | COCAN | 179.4 | 175.6 | 237.6 | -165.7 | 243.2 | 58.4 | 13.82 |
| | CO_22 | CPRAD | 394.3 | 389.8 | 418.3 | 134.6 | 426.8 | 367.0 | 0.84 |
| | CO_47 | CSUES | 107.9 | 104.3 | 194.8 | 84.6 | 197.6 | 65.4 | 6.38 |
| | CO_04 | CVHER | 308.1 | 303.7 | 341.4 | 5.1 | 349.5 | 303.7 | 3.01 |
| CO_20011119210124 | CO_01 | CBOG1 | 266.2 | 262.7 | 306.9 | 119.6 | 313.8 | 234.1 | 1.74 |
| | CO_235 | CBOG1_R | 266.2 | 262.7 | 306.9 | 119.6 | 313.8 | 234.1 | 0.43 |
| | CO_17 | CCALA | 389.7 | 385.9 | 414.4 | 35.3 | 423.4 | 384.3 | 0.25 |
| | CO_66 | CFQNE | 167.8 | 164.2 | 230.5 | 65.0 | 236.2 | 151.0 | 4.98 |
| | CO_91 | CNOBS | 106.5 | 104.2 | 193.4 | 86.6 | 197.4 | 58.7 | 4.42 |
| | CO_10 | CNORC | 253.1 | 249.2 | 294.3 | -14.4 | 301.6 | 248.8 | 7.51 |
| | CO_19 | CPLA1 | 230.2 | 226.6 | 276.2 | -85.5 | 283.1 | 209.8 | 2.85 |
| | CO_03 | CROSA | 261.7 | 258.0 | 303.2 | 85.9 | 310.3 | 243.5 | 1.90 |
| | CO_92 | CSHEL | 296.0 | 292.3 | 331.9 | -111.8 | 339.6 | 270.1 | 2.17 |
| | CO_93 | CTUN1 | 139.6 | 136.4 | 212.3 | 80.1 | 217.2 | 110.8 | 2.53 |
| CO_20040618145954 | CO_66 | CFQNE | 150.7 | 147.9 | 211.9 | -89.6 | 215.7 | 117.7 | 2.29 |
| | CO_45 | CSLUI | 220.4 | 218.6 | 263.7 | -214.4 | 267.8 | 42.5 | 1.52 |
| CO_20041003083030 | CO_29 | CBUC1 | 37.4 | 36.4 | 164.0 | -34.7 | 166.0 | 10.9 | 1.40 |
| | CO_40 | CBUIS | 46.3 | 45.4 | 166.2 | -43.9 | 168.2 | 11.4 | 4.73 |
| | CO_12 | CCHIN | 254.9 | 252.9 | 297.8 | 149.3 | 302.9 | 204.4 | 0.37 |
| | CO_66 | CFQNE | 164.7 | 162.4 | 227.8 | 66.6 | 231.9 | 148.3 | 6.40 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20041003083030 | CO_13 | CGUAD | 257.8 | 255.4 | 298.7 | 46.9 | 304.4 | 251.1 | 2.58 |
| | CO_77 | COCAN | 169.9 | 168.7 | 231.2 | -155.6 | 234.8 | 65.3 | 6.94 |
| | CO_04 | CVHER | 303.5 | 301.0 | 338.1 | 15.2 | 344.4 | 300.6 | 1.38 |
| CO_20050225064124 | CO_29 | CBUC1 | 40.5 | 36.9 | 163.9 | 17.4 | 167.5 | 32.6 | 6.83 |
| | CO_86 | CBUC5 | 32.3 | 28.7 | 162.2 | 13.2 | 165.7 | 25.6 | 25.05 |
| | CO_40 | CBUIS | 49.2 | 45.4 | 165.9 | 17.8 | 169.8 | 41.8 | 11.28 |
| | CO_17 | CCALA | 379.3 | 378.8 | 407.0 | -377.6 | 412.9 | 29.7 | 0.32 |
| | CO_66 | CFQNE | 159.9 | 158.1 | 224.5 | -144.8 | 229.1 | 63.5 | 6.14 |
| | CO_13 | CGUAD | 253.1 | 252.1 | 295.8 | -248.0 | 300.8 | 45.6 | 2.08 |
| | CO_77 | COCAN | 173.1 | 169.4 | 231.5 | 69.7 | 237.6 | 154.4 | 10.14 |
| | CO_02 | CPENS | 279.1 | 278.8 | 318.8 | -278.5 | 323.5 | 12.2 | 11.26 |
| | CO_85 | CSARD | 151.3 | 148.4 | 216.5 | 105.4 | 221.7 | 104.6 | 1.85 |
| | CO_92 | CSHEL | 283.8 | 282.1 | 322.0 | -260.8 | 327.9 | 107.4 | 1.51 |
| | CO_116 | CTUN2 | 134.9 | 132.3 | 207.7 | -105.3 | 212.5 | 80.1 | 6.67 |
| | CO_11 | CVIL1 | 290.4 | 287.6 | 325.6 | -218.5 | 332.5 | 187.0 | 1.03 |
| CO_20060101094315 | CO_121 | CCUC3 | 456.9 | 454.7 | 457.8 | 373.5 | 462.5 | 261.3 | 0.62 |
| | CO_96 | CGUAG | 182.1 | 180.2 | 193.3 | 161.5 | 195.7 | 83.3 | 5.13 |
| CO_20060110031441 | CO_86 | CBUC5 | 39.2 | 36.3 | 161.5 | -30.9 | 163.7 | 19.0 | 12.68 |
| | CO_17 | CCALA | 384.0 | 380.8 | 408.0 | -125.2 | 415.9 | 359.5 | 0.19 |
| | CO_42 | CCUC2 | 144.2 | 141.0 | 209.8 | -29.6 | 214.1 | 137.9 | 2.57 |
| | CO_121 | CCUC3 | 140.8 | 137.6 | 207.6 | -29.6 | 211.9 | 134.4 | 1.47 |
| | CO_51 | CMAN1 | 337.8 | 334.5 | 366.5 | -148.9 | 373.8 | 299.5 | 2.59 |
| | CO_122 | CNOCA | 247.9 | 244.6 | 288.1 | -115.6 | 294.2 | 215.5 | 2.10 |
| | CO_123 | CTUN3 | 133.6 | 130.6 | 205.2 | 27.0 | 208.9 | 128.2 | 0.86 |
| CO_20060508150739 | CO_17 | CCALA | 382.9 | 380.3 | 410.9 | 137.5 | 418.1 | 355.0 | 0.19 |
| | CO_12 | CCHIN | 252.9 | 251.0 | 299.6 | 201.3 | 304.1 | 151.4 | 0.69 |
| | CO_42 | CCUC2 | 141.2 | 138.9 | 214.3 | -104.9 | 218.3 | 91.1 | 3.71 |
| | CO_121 | CCUC3 | 137.7 | 135.4 | 212.2 | -102.6 | 216.1 | 88.4 | 1.87 |
| | CO_122 | CNOCA | 245.6 | 242.9 | 291.2 | 54.4 | 296.8 | 237.0 | 2.02 |
| | CO_03 | CROSA | 256.4 | 254.1 | 302.1 | 149.9 | 307.1 | 205.9 | 1.26 |
| | CO_123 | CTUN3 | 136.8 | 135.0 | 214.3 | 110.3 | 217.3 | 79.3 | 1.18 |
| | CO_04 | CVHER | 302.5 | 299.9 | 339.9 | 101.2 | 346.1 | 282.7 | 1.05 |
| CO_20070506044714 | CO_06 | CANSE | 355.8 | 351.2 | 383.2 | -160.2 | 392.4 | 312.4 | 1.68 |
| | CO_29 | CBUC1 | 42.1 | 38.2 | 166.7 | -32.8 | 169.9 | 19.7 | 4.44 |
| | CO_40 | CBUIS | 51.2 | 47.3 | 168.9 | -41.4 | 172.3 | 23.1 | 10.91 |
| | CO_42 | CCUC2 | 141.0 | 136.4 | 210.4 | -34.4 | 216.2 | 132.0 | 3.52 |
| | CO_121 | CCUC3 | 137.5 | 133.0 | 208.3 | -34.2 | 214.0 | 128.5 | 3.10 |
| | CO_07 | CFILA | 330.0 | 325.3 | 360.1 | -140.6 | 369.0 | 293.3 | 0.65 |
| | CO_13 | CGUAD | 258.2 | 253.8 | 298.5 | -37.6 | 306.2 | 251.0 | 3.87 |
| | CO_50 | CIBA1 | 357.4 | 352.9 | 384.4 | -55.4 | 393.5 | 348.5 | 3.04 |
| | CO_105 | CIBA3 | 354.9 | 350.4 | 382.2 | -50.2 | 391.2 | 346.8 | 1.89 |
| | CO_51 | CMAN1 | 338.1 | 333.4 | 367.6 | -122.5 | 376.5 | 310.1 | 7.65 |
| | CO_122 | CNOCA | 248.1 | 243.4 | 289.7 | -95.2 | 297.4 | 224.0 | 5.87 |
| | CO_19 | CPLA1 | 225.1 | 220.7 | 271.7 | -148.7 | 278.8 | 163.1 | 3.95 |
| | CO_124 | CREAC | 263.6 | 259.3 | 304.3 | 35.5 | 311.6 | 257.2 | 3.58 |
| | CO_03 | CROSA | 257.6 | 253.3 | 299.3 | 0.8 | 306.7 | 253.3 | 3.71 |
| | CO_85 | CSARD | 150.1 | 145.5 | 216.4 | -72.2 | 222.4 | 126.3 | 1.39 |
| | CO_123 | CTUN3 | 136.8 | 132.6 | 210.4 | 41.0 | 215.3 | 126.9 | 2.34 |
| | CO_04 | CVHER | 304.6 | 300.0 | 338.3 | -83.1 | 346.7 | 288.3 | 2.79 |
| | CO_11 | CVIL1 | 292.4 | 288.2 | 328.1 | 105.6 | 335.3 | 269.2 | 2.10 |
| CO_20080217211502 | CO_01 | CBOG1 | 262.2 | 257.6 | 299.8 | -79.5 | 307.5 | 245.0 | 2.17 |
| | CO_235 | CBOG1_R | 262.2 | 257.6 | 299.8 | -79.5 | 307.5 | 245.0 | 0.72 |
| | CO_29 | CBUC1 | 40.8 | 36.1 | 161.1 | -16.6 | 164.3 | 32.0 | 5.37 |
| | CO_86 | CBUC5 | 32.8 | 28.1 | 159.4 | -14.6 | 162.4 | 24.0 | 21.59 |
| | CO_40 | CBUIS | 49.7 | 45.1 | 163.2 | -22.8 | 166.7 | 38.8 | 10.68 |
| | CO_12 | CCHIN | 253.0 | 248.5 | 292.4 | -37.2 | 299.8 | 245.7 | 0.72 |
| | CO_42 | CCUC2 | 141.0 | 136.7 | 207.0 | 31.1 | 212.1 | 133.7 | 6.86 |
| | CO_121 | CCUC3 | 137.5 | 133.2 | 204.8 | 29.8 | 209.9 | 130.5 | 4.10 |
| | CO_66 | CFQNE | 163.5 | 158.8 | 223.0 | -57.7 | 229.2 | 147.9 | 7.30 |

(.../...)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20080217211502 | CO_13 | CGUAD | 257.4 | 252.8 | 294.9 | -143.3 | 302.6 | 208.2 | 2.69 |
| | CO_124 | CREAC | 263.3 | 258.7 | 300.7 | -80.3 | 308.5 | 245.9 | 1.96 |
| | CO_03 | CROSA | 257.0 | 252.3 | 295.7 | -109.7 | 303.3 | 227.2 | 2.19 |
| | CO_85 | CSARD | 149.5 | 145.2 | 212.4 | -5.3 | 218.0 | 145.1 | 2.48 |
| | CO_123 | CTUN3 | 136.9 | 132.5 | 205.7 | -18.3 | 211.2 | 131.2 | 1.42 |
| | CO_97 | CVERS | 431.1 | 426.7 | 450.0 | -310.6 | 459.8 | 292.3 | 1.43 |
| | CO_04 | CVHER | 303.6 | 299.0 | 335.0 | -200.5 | 343.2 | 221.8 | 1.83 |
| | CO_11 | CVIL1 | 292.6 | 288.3 | 324.9 | -22.5 | 332.8 | 287.4 | 1.77 |
| CO_20090420085402 | CO_29 | CBUC1 | 77.2 | 73.5 | 144.4 | -41.4 | 147.6 | 60.7 | 3.81 |
| | CO_86 | CBUC5 | 84.9 | 81.2 | 148.4 | -48.3 | 151.7 | 65.3 | 16.86 |
| | CO_40 | CBUIS | 68.1 | 64.4 | 140.1 | -37.2 | 143.0 | 52.6 | 18.46 |
| | CO_121 | CCUC3 | 98.3 | 95.4 | 157.2 | 67.0 | 159.2 | 70.6 | 3.89 |
| | CO_66 | CFQNE | 251.1 | 248.1 | 276.3 | -232.5 | 281.5 | 86.7 | 1.00 |
| | CO_88 | CMONT | 298.6 | 295.2 | 317.4 | -26.6 | 323.6 | 294.0 | 2.03 |
| | CO_77 | COCAN | 60.6 | 58.6 | 138.9 | 57.4 | 139.8 | 21.3 | 21.61 |
| | CO_38 | CPAMP | 89.1 | 85.9 | 152.3 | 12.3 | 155.3 | 85.4 | 4.64 |
| CO_20091027162553 | CO_06 | CANSE | 355.6 | 352.0 | 383.2 | -128.7 | 391.3 | 327.6 | 1.01 |
| | CO_29 | CBUC1 | 44.2 | 41.4 | 165.6 | -37.5 | 168.3 | 17.7 | 10.41 |
| | CO_40 | CBUIS | 53.2 | 50.6 | 168.0 | -46.4 | 170.8 | 20.1 | 12.21 |
| | CO_42 | CCUC2 | 142.5 | 138.9 | 210.5 | -50.9 | 215.5 | 129.2 | 6.55 |
| | CO_121 | CCUC3 | 139.0 | 135.4 | 208.4 | -50.3 | 213.3 | 125.7 | 4.36 |
| | CO_66 | CFQNE | 162.7 | 159.3 | 226.0 | 27.5 | 230.9 | 157.2 | 6.15 |
| | CO_13 | CGUAD | 257.4 | 254.0 | 297.8 | -13.2 | 304.4 | 253.7 | 2.12 |
| | CO_50 | CIBA1 | 356.6 | 353.2 | 383.9 | -20.6 | 391.9 | 352.6 | 0.89 |
| | CO_51 | CMAN1 | 337.7 | 334.1 | 367.4 | -91.4 | 375.2 | 321.4 | 3.56 |
| | CO_128 | CMON2 | 438.6 | 436.7 | 459.7 | -430.6 | 467.4 | 73.0 | 0.47 |
| | CO_77 | COCAN | 176.4 | 173.4 | 234.8 | -144.4 | 239.9 | 96.0 | 8.54 |
| | CO_19 | CPLA1 | 225.5 | 222.0 | 271.6 | -132.8 | 277.8 | 177.9 | 2.93 |
| | CO_03 | CROSA | 256.5 | 253.1 | 298.2 | 25.4 | 304.6 | 252.0 | 1.28 |
| | CO_45 | CSLUI | 234.2 | 230.6 | 278.2 | -111.2 | 284.6 | 202.0 | 3.10 |
| | CO_46 | CSONS | 287.4 | 283.8 | 323.6 | -119.6 | 330.7 | 257.4 | 3.50 |
| | CO_97 | CVERS | 431.9 | 428.3 | 452.6 | -110.5 | 461.7 | 413.8 | 1.18 |
| | CO_04 | CVHER | 304.1 | 300.5 | 337.8 | -54.5 | 345.2 | 295.5 | 1.61 |
| CO_20120224134317 | CO_01 | CBOG1 | 253.2 | 249.7 | 297.5 | -77.5 | 303.9 | 237.3 | 1.99 |
| | CO_133 | CCAQ1 | 269.9 | 266.4 | 310.8 | -106.3 | 317.5 | 244.2 | 1.11 |
| | CO_134 | CCAQ2 | 270.8 | 267.2 | 311.6 | -107.1 | 318.3 | 244.8 | 0.92 |
| | CO_121 | CCUC3 | 146.3 | 143.1 | 217.5 | 59.7 | 221.3 | 131.2 | 5.42 |
| | CO_65 | CFLOR | 635.5 | 631.9 | 644.8 | -199.5 | 656.8 | 599.4 | 0.07 |
| | CO_135 | CGIRO | 48.5 | 46.6 | 171.7 | 46.1 | 173.2 | 16.2 | 11.76 |
| | CO_136 | CGRAL | 261.8 | 258.3 | 304.6 | -78.5 | 311.1 | 246.0 | 1.00 |
| | CO_13 | CGUAD | 248.3 | 245.1 | 292.9 | -4.3 | 299.0 | 245.1 | 1.56 |
| | CO_50 | CIBA1 | 347.4 | 344.2 | 377.9 | -3.7 | 385.4 | 344.2 | 1.01 |
| | CO_51 | CMAN1 | 328.2 | 325.0 | 361.8 | 69.0 | 368.6 | 318.1 | 3.16 |
| | CO_128 | CMON2 | 434.1 | 432.7 | 458.2 | 424.7 | 464.6 | 94.0 | 1.01 |
| | CO_122 | CNOCA | 238.3 | 235.0 | 284.9 | 57.0 | 290.5 | 228.6 | 3.83 |
| | CO_71 | CPAS2 | 766.8 | 763.4 | 771.4 | -104.7 | 785.0 | 756.1 | 0.07 |
| | CO_137 | CPGA1 | 254.0 | 250.5 | 298.2 | -76.6 | 304.6 | 238.4 | 1.77 |
| | CO_21 | CPOP2 | 612.5 | 609.2 | 623.6 | -57.1 | 635.0 | 606.5 | 0.66 |
| | CO_138 | CPOP5 | 610.3 | 607.0 | 621.5 | -56.9 | 632.8 | 604.3 | 0.27 |
| | CO_124 | CREAC | 254.3 | 250.8 | 298.4 | -77.4 | 304.9 | 238.5 | 1.15 |
| | CO_11 | CVIL1 | 284.2 | 280.7 | 322.2 | -148.6 | 329.2 | 238.1 | 1.01 |
| | CO_139 | CYOTO | 473.6 | 470.3 | 492.9 | 45.2 | 502.0 | 468.4 | 0.07 |
| | CO_98 | RAC02 | 533.8 | 530.6 | 549.1 | 10.9 | 559.2 | 530.5 | 0.52 |
| CO_20120901050945 | CO_01 | CBOG1 | 254.1 | 250.8 | 298.7 | 84.5 | 304.3 | 237.0 | 1.01 |
| | CO_28 | CBSOL | 492.2 | 488.7 | 509.2 | -293.3 | 519.1 | 390.6 | 0.18 |
| | CO_134 | CCAQ2 | 271.2 | 268.0 | 312.7 | 114.3 | 318.3 | 243.4 | 0.62 |
| | CO_140 | CCODA | 369.9 | 366.8 | 397.3 | -305.3 | 405.1 | 203.3 | 0.72 |
| | CO_42 | CCUC2 | 149.6 | 146.0 | 218.1 | -66.6 | 222.9 | 129.9 | 2.73 |
| | CO_121 | CCUC3 | 146.1 | 142.5 | 216.0 | -65.7 | 220.7 | 126.5 | 5.21 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20120901050945 | CO_141 | CCUFI | 773.2 | 770.0 | 778.3 | 121.6 | 791.4 | 760.6 | 0.02 |
| | CO_13 | CGUAD | 250.6 | 247.4 | 294.5 | 11.6 | 300.6 | 247.3 | 1.53 |
| | CO_50 | CIBA1 | 349.8 | 346.6 | 379.8 | 14.5 | 387.3 | 346.4 | 0.62 |
| | CO_51 | CMAN1 | 331.6 | 328.1 | 363.8 | -59.1 | 371.3 | 322.8 | 2.20 |
| | CO_128 | CMON2 | 439.2 | 436.8 | 461.1 | -422.4 | 469.2 | 111.2 | 0.62 |
| | CO_70 | CPAS1 | 774.9 | 771.6 | 779.7 | 126.5 | 792.9 | 761.5 | 0.01 |
| | CO_71 | CPAS2 | 768.5 | 765.2 | 773.4 | 129.7 | 786.6 | 754.5 | 0.06 |
| | CO_21 | CPOP2 | 614.5 | 611.2 | 625.7 | 77.0 | 636.7 | 606.6 | 0.77 |
| | CO_138 | CPOP5 | 612.3 | 609.0 | 623.6 | 76.7 | 634.5 | 604.4 | 0.13 |
| | CO_142 | CPROV | 1185.1 | 1183.1 | 1177.5 | -1171.4 | 1196.6 | 164.3 | 0.04 |
| | CO_03 | CROSA | 249.4 | 246.2 | 294.9 | 49.7 | 300.7 | 241.6 | 1.32 |
| | CO_126 | CTUM2 | 833.2 | 829.9 | 834.8 | -30.9 | 849.4 | 829.4 | 0.01 |
| | CO_129 | CURIB | 572.9 | 569.4 | 585.1 | -345.1 | 596.2 | 452.4 | 0.12 |
| | CO_139 | CYOTO | 476.4 | 473.1 | 495.1 | -30.1 | 504.5 | 472.2 | 0.10 |
| CO_20130725120926 | CO_27 | CBMAL | 556.3 | 555.4 | 570.5 | -549.0 | 578.6 | 84.3 | 0.07 |
| | CO_01 | CBOG1 | 252.1 | 249.9 | 294.1 | -189.9 | 299.5 | 162.4 | 0.71 |
| | CO_28 | CBSOL | 480.4 | 479.2 | 498.6 | -458.4 | 506.1 | 139.2 | 0.30 |
| | CO_141 | CCUFI | 768.8 | 767.1 | 774.3 | -672.5 | 785.9 | 367.6 | 0.03 |
| | CO_65 | CFLOR | 634.3 | 632.2 | 643.7 | -483.9 | 654.1 | 406.0 | 0.02 |
| | CO_152 | CGIR2 | 38.2 | 35.5 | 162.2 | 9.8 | 164.7 | 34.2 | 6.07 |
| | CO_51 | CMAN1 | 323.4 | 322.5 | 356.2 | -317.8 | 361.4 | 54.5 | 0.75 |
| | CO_122 | CNOCA | 233.3 | 232.4 | 278.6 | -230.0 | 282.7 | 33.7 | 1.77 |
| | CO_70 | CPAS1 | 770.5 | 768.8 | 775.7 | -671.7 | 787.4 | 372.6 | 0.01 |
| | CO_03 | CROSA | 245.7 | 243.8 | 289.3 | -205.6 | 294.4 | 131.0 | 0.54 |
| | CO_151 | CSTM1 | 514.3 | 511.6 | 529.1 | 80.3 | 538.4 | 505.3 | 0.23 |
| | CO_123 | CTUN3 | 128.7 | 126.2 | 202.9 | -76.6 | 206.9 | 100.3 | 0.82 |
| | CO_129 | CURIB | 571.2 | 568.8 | 583.6 | 327.7 | 593.0 | 465.0 | 0.10 |
| | CO_153 | CVALL | 426.4 | 423.7 | 447.3 | 149.0 | 455.2 | 396.8 | 0.51 |
| | CO_139 | CYOTO | 469.4 | 468.2 | 488.7 | -449.6 | 496.0 | 130.6 | 0.03 |
| CO_20140207203711 | CO_06 | CANSE | 350.0 | 345.6 | 377.0 | -258.2 | 385.3 | 229.6 | 0.98 |
| | CO_28 | CBSOL | 485.7 | 482.1 | 501.6 | -453.5 | 511.2 | 163.4 | 0.29 |
| | CO_40 | CBUIS | 40.3 | 35.8 | 163.2 | -14.4 | 165.3 | 32.8 | 15.24 |
| | CO_155 | CCNEG | 306.0 | 302.1 | 338.3 | -0.7 | 345.5 | 302.1 | 1.69 |
| | CO_140 | CCODA | 352.8 | 348.4 | 378.7 | -118.9 | 387.1 | 327.4 | 0.50 |
| | CO_42 | CCUC2 | 138.0 | 134.1 | 207.1 | 34.5 | 211.0 | 130.4 | 7.07 |
| | CO_65 | CFLOR | 646.9 | 642.6 | 653.8 | -150.1 | 666.3 | 624.7 | 0.05 |
| | CO_152 | CGIR2 | 27.5 | 23.0 | 161.0 | -12.9 | 162.7 | 19.0 | 26.72 |
| | CO_13 | CGUAD | 256.6 | 252.1 | 295.6 | -121.3 | 302.6 | 221.0 | 3.37 |
| | CO_154 | CLOBA | 250.9 | 246.3 | 290.3 | -157.8 | 297.2 | 189.1 | 9.33 |
| | CO_51 | CMAN1 | 333.5 | 329.0 | 362.4 | -222.5 | 370.5 | 242.2 | 1.56 |
| | CO_122 | CNOCA | 243.2 | 238.7 | 284.3 | -163.7 | 291.0 | 173.7 | 2.93 |
| | CO_137 | CPGA1 | 265.4 | 261.1 | 304.0 | -57.0 | 310.9 | 254.8 | 1.50 |
| | CO_19 | CPLA1 | 216.4 | 212.5 | 263.4 | -189.2 | 269.3 | 96.7 | 3.34 |
| | CO_46 | CSONS | 281.0 | 276.7 | 316.9 | -216.2 | 324.1 | 172.6 | 3.31 |
| | CO_151 | CSTM1 | 503.7 | 499.1 | 517.6 | -232.5 | 528.3 | 441.5 | 0.40 |
| | CO_126 | CTUM2 | 837.4 | 832.8 | 837.0 | -489.1 | 852.4 | 672.7 | 0.02 |
| | CO_123 | CTUN3 | 141.4 | 137.5 | 210.7 | -0.5 | 215.1 | 137.5 | 2.12 |
| | CO_129 | CURIB | 558.6 | 554.7 | 570.1 | -8.8 | 580.9 | 554.6 | 0.09 |
| | CO_97 | CVERS | 427.8 | 423.3 | 447.7 | -284.0 | 457.2 | 313.7 | 1.37 |
| | CO_04 | CVHER | 301.2 | 296.7 | 334.0 | -177.7 | 341.7 | 237.6 | 2.45 |
| | CO_139 | CYOTO | 480.3 | 475.7 | 496.0 | -284.3 | 506.3 | 381.2 | 0.05 |
| CO_20140314232636 | CO_160 | CARIG | 148.3 | 147.0 | 196.7 | 139.9 | 199.4 | 48.0 | 7.12 |
| | CO_27 | CBMAL | 847.2 | 844.5 | 845.7 | 461.2 | 857.6 | 706.9 | 0.02 |
| | CO_28 | CBSOL | 664.9 | 662.6 | 668.9 | 476.2 | 678.1 | 460.9 | 0.28 |
| | CO_140 | CCODA | 65.1 | 63.1 | 145.8 | 52.4 | 148.3 | 36.6 | 40.95 |
| | CO_141 | CCUFI | 1116.8 | 1113.9 | 1109.7 | 453.1 | 1125.1 | 1016.3 | 0.01 |
| | CO_65 | CFLOR | 1011.3 | 1008.3 | 1005.7 | 266.3 | 1020.0 | 972.2 | 0.01 |
| | CO_156 | CMACA | 909.3 | 906.3 | 905.9 | 67.9 | 919.0 | 903.8 | 0.04 |
| | CO_51 | CMAN1 | 643.0 | 640.2 | 647.7 | 264.4 | 657.1 | 583.1 | 0.48 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20140314232636 | CO_122 | CNOCA | 564.4 | 561.5 | 571.3 | 193.6 | 580.1 | 527.3 | 0.24 |
| | CO_71 | CPAS2 | 1114.2 | 1111.3 | 1106.9 | 443.0 | 1122.4 | 1018.0 | 0.12 |
| | CO_142 | CPROV | 977.4 | 976.1 | 974.1 | 921.7 | 986.4 | 321.9 | 0.08 |
| | CO_03 | CROSA | 622.1 | 619.1 | 627.4 | 130.4 | 636.8 | 605.4 | 0.10 |
| | CO_151 | CSTM1 | 170.0 | 168.1 | 212.6 | 142.1 | 216.0 | 91.3 | 5.62 |
| | CO_159 | CTAME | 445.9 | 442.8 | 457.5 | -143.2 | 465.5 | 419.0 | 0.35 |
| | CO_126 | CTUM2 | 1135.3 | 1132.6 | 1127.2 | 608.7 | 1143.1 | 952.9 | 0.01 |
| | CO_129 | CURIB | 190.6 | 187.7 | 227.5 | -99.0 | 232.5 | 159.5 | 1.56 |
| | CO_139 | CYOTO | 793.0 | 790.2 | 793.0 | 351.7 | 804.3 | 707.4 | 0.02 |
| CO_20141125202015 | CO_59 | CARBE | 321.2 | 319.3 | 354.6 | 283.0 | 359.7 | 151.3 | 0.67 |
| | CO_60 | CARME | 378.3 | 377.3 | 406.5 | 376.4 | 411.5 | 46.8 | 1.93 |
| | CO_167 | CBARR | 74.1 | 71.3 | 174.2 | 38.8 | 176.7 | 61.0 | 12.42 |
| | CO_27 | CBMAL | 562.4 | 561.8 | 577.4 | 563.7 | 584.8 | 1.8 | 0.12 |
| | CO_01 | CBOG1 | 265.0 | 263.0 | 306.9 | 226.2 | 311.1 | 137.4 | 1.27 |
| | CO_28 | CBSOL | 479.4 | 477.6 | 498.2 | 431.0 | 505.6 | 209.4 | 0.18 |
| | CO_12 | CCHIN | 258.8 | 256.4 | 301.6 | 196.2 | 305.9 | 167.3 | 0.44 |
| | CO_64 | CCRUZ | 723.0 | 721.5 | 730.7 | 681.9 | 741.2 | 240.3 | 0.37 |
| | CO_141 | CCUFI | 779.5 | 778.0 | 785.3 | 739.4 | 796.6 | 246.8 | 0.02 |
| | CO_168 | CCUMB | 837.2 | 835.8 | 841.0 | 801.3 | 853.1 | 242.9 | 0.03 |
| | CO_65 | CFLOR | 647.0 | 645.0 | 656.7 | 561.4 | 666.7 | 320.4 | 0.06 |
| | CO_66 | CFQNE | 165.6 | 163.6 | 229.5 | 143.1 | 232.3 | 82.7 | 5.38 |
| | CO_152 | CGIR2 | 22.3 | 19.1 | 161.0 | -8.5 | 162.9 | 17.1 | 8.85 |
| | CO_13 | CGUAD | 254.8 | 253.5 | 298.1 | 246.5 | 301.6 | 66.6 | 1.79 |
| | CO_161 | CGUYA | 307.8 | 307.2 | 345.1 | 309.1 | 348.7 | 2.5 | 0.91 |
| | CO_50 | CIBA1 | 353.6 | 352.3 | 383.8 | 344.3 | 388.8 | 83.3 | 0.88 |
| | CO_154 | CLOBA | 244.7 | 241.5 | 286.6 | -34.1 | 292.6 | 239.1 | 3.56 |
| | CO_51 | CMAN1 | 329.9 | 329.3 | 363.8 | 331.2 | 367.8 | 7.1 | 3.07 |
| | CO_122 | CNOCA | 239.6 | 239.0 | 285.9 | 240.9 | 288.6 | 3.4 | 3.10 |
| | CO_162 | CORTC | 401.0 | 399.4 | 426.1 | 378.9 | 432.0 | 132.1 | 0.60 |
| | CO_169 | CPALC | 410.7 | 410.0 | 435.8 | 411.5 | 441.1 | 18.4 | 0.86 |
| | CO_70 | CPAS1 | 781.3 | 779.7 | 786.8 | 739.5 | 798.1 | 251.8 | 0.02 |
| | CO_71 | CPAS2 | 775.0 | 773.5 | 780.7 | 732.2 | 792.0 | 254.0 | 0.40 |
| | CO_137 | CPGA1 | 265.7 | 263.7 | 307.5 | 227.4 | 311.7 | 136.7 | 1.36 |
| | CO_163 | CPIZC | 513.6 | 512.5 | 530.9 | 506.3 | 538.1 | 91.1 | 0.11 |
| | CO_142 | CPROV | 1160.9 | 1157.9 | 1152.9 | 328.4 | 1171.9 | 1109.9 | 0.05 |
| | CO_165 | CRECR | 323.2 | 322.3 | 358.6 | 323.0 | 362.6 | 28.8 | 1.63 |
| | CO_03 | CROSA | 257.3 | 255.6 | 301.0 | 235.6 | 304.8 | 103.6 | 1.51 |
| | CO_151 | CSTM1 | 498.5 | 495.3 | 514.1 | -167.5 | 523.7 | 466.0 | 0.19 |
| | CO_159 | CTAME | 151.5 | 148.3 | 216.4 | -95.4 | 220.9 | 113.6 | 1.39 |
| | CO_126 | CTUM2 | 834.6 | 833.6 | 838.1 | 828.9 | 849.9 | 105.2 | 0.01 |
| | CO_123 | CTUN3 | 143.4 | 140.9 | 214.1 | 103.1 | 217.1 | 98.1 | 1.18 |
| | CO_129 | CURIB | 556.5 | 553.5 | 569.0 | -402.8 | 579.2 | 379.2 | 0.04 |
| | CO_153 | CVALL | 410.6 | 407.4 | 432.6 | -214.2 | 441.0 | 346.4 | 0.33 |
| | CO_04 | CVHER | 298.4 | 297.5 | 335.9 | 297.2 | 339.7 | 36.7 | 1.24 |
| | CO_139 | CYOTO | 477.4 | 476.5 | 497.5 | 475.0 | 504.0 | 56.6 | 0.08 |
| CO_20141214014930 | CO_59 | CARBE | 155.8 | 153.8 | 214.1 | -87.8 | 218.1 | 126.2 | 1.87 |
| | CO_60 | CARME | 238.4 | 237.4 | 279.0 | -221.7 | 283.1 | 84.8 | 1.93 |
| | CO_27 | CBMAL | 432.7 | 431.9 | 452.1 | -410.2 | 458.4 | 134.9 | 0.06 |
| | CO_01 | CBOG1 | 98.9 | 96.7 | 179.5 | -46.3 | 182.8 | 84.9 | 3.23 |
| | CO_28 | CBSOL | 418.5 | 417.8 | 439.0 | -404.0 | 445.0 | 106.5 | 0.08 |
| | CO_17 | CCALA | 237.4 | 236.4 | 278.3 | -218.5 | 282.4 | 90.2 | 0.43 |
| | CO_12 | CCHIN | 97.7 | 95.2 | 178.9 | -5.2 | 182.3 | 95.0 | 1.09 |
| | CO_155 | CCNEG | 148.5 | 146.0 | 208.5 | -6.6 | 212.6 | 145.9 | 2.37 |
| | CO_64 | CCRUZ | 562.3 | 560.4 | 574.3 | -383.1 | 583.0 | 408.5 | 0.07 |
| | CO_141 | CCUFI | 619.4 | 617.6 | 629.2 | -428.9 | 638.5 | 443.7 | 0.01 |
| | CO_65 | CFLOR | 481.1 | 478.9 | 496.3 | -238.8 | 504.4 | 414.9 | 0.06 |
| | CO_66 | CFQNE | 4.2 | 3.3 | 152.0 | -3.3 | 153.7 | 0.0 | 12.94 |
| | CO_50 | CIBA1 | 202.9 | 201.6 | 249.8 | -175.3 | 253.8 | 99.5 | 0.90 |
| | CO_156 | CMACA | 367.5 | 365.1 | 390.6 | -35.2 | 397.5 | 363.4 | 0.33 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20141214014930 | CO_51 | CMAN1 | 205.7 | 205.3 | 253.3 | -203.4 | 256.6 | 27.5 | 0.86 |
| | CO_122 | CNOCA | 129.7 | 129.3 | 197.0 | -128.1 | 199.6 | 17.4 | 5.01 |
| | CO_162 | CORTC | 241.9 | 240.2 | 280.7 | -179.8 | 285.4 | 159.2 | 1.65 |
| | CO_169 | CPALC | 292.0 | 291.5 | 324.8 | -288.5 | 329.1 | 42.1 | 0.20 |
| | CO_71 | CPAS2 | 614.4 | 612.5 | 624.0 | -419.0 | 633.3 | 446.2 | 0.02 |
| | CO_137 | CPGA1 | 99.6 | 97.4 | 179.9 | -47.8 | 183.2 | 84.9 | 2.36 |
| | CO_163 | CPIZC | 408.5 | 408.2 | 430.2 | -407.2 | 435.6 | 28.7 | 0.06 |
| | CO_22 | CPRAD | 229.7 | 227.7 | 270.3 | -141.4 | 275.1 | 178.4 | 1.23 |
| | CO_124 | CREAC | 100.0 | 97.8 | 180.1 | -47.3 | 183.4 | 85.6 | 2.25 |
| | CO_165 | CRECR | 190.6 | 189.9 | 242.5 | -185.3 | 245.8 | 41.8 | 1.47 |
| | CO_03 | CROSA | 95.8 | 94.1 | 178.5 | -71.8 | 181.5 | 60.8 | 1.38 |
| | CO_151 | CSTM1 | 638.3 | 635.8 | 645.6 | -23.6 | 655.9 | 635.4 | 0.10 |
| | CO_159 | CTAME | 238.3 | 237.2 | 278.3 | 216.8 | 282.4 | 96.5 | 0.47 |
| | CO_123 | CTUN3 | 40.0 | 39.4 | 157.1 | 38.8 | 159.0 | 7.4 | 1.47 |
| | CO_129 | CURIB | 720.4 | 718.1 | 724.9 | 222.4 | 736.1 | 682.5 | 0.04 |
| | CO_153 | CVALL | 565.0 | 562.5 | 575.6 | 78.1 | 584.9 | 557.1 | 0.07 |
| | CO_04 | CVHER | 163.6 | 162.9 | 221.0 | -159.1 | 224.1 | 35.3 | 1.56 |
| | CO_139 | CYOTO | 335.0 | 333.9 | 362.6 | -301.1 | 367.9 | 144.2 | 0.05 |
| | CO_98 | RAC02 | 389.2 | 387.8 | 411.6 | -325.3 | 417.9 | 210.8 | 0.38 |
| CO_20150310205544 | CO_39 | CANAP | 300.1 | 289.6 | 325.6 | -43.2 | 341.4 | 286.3 | 11.46 |
| | CO_174 | CARAN | 267.9 | 257.4 | 299.2 | -7.9 | 314.5 | 257.3 | 7.28 |
| | CO_59 | CARBE | 323.7 | 313.1 | 346.6 | -20.7 | 362.6 | 312.5 | 5.18 |
| | CO_160 | CARIG | 370.3 | 362.2 | 389.9 | -273.8 | 404.3 | 237.0 | 4.81 |
| | CO_60 | CARME | 385.9 | 375.8 | 402.8 | -157.9 | 419.2 | 340.9 | 8.60 |
| | CO_175 | CARTI | 278.3 | 267.8 | 308.0 | -4.0 | 323.4 | 267.8 | 5.89 |
| | CO_176 | CBANC | 260.0 | 249.6 | 292.6 | -7.5 | 307.8 | 249.5 | 22.95 |
| | CO_177 | CBART | 267.9 | 257.4 | 299.2 | -1.6 | 314.5 | 257.4 | 5.61 |
| | CO_27 | CBMAL | 571.7 | 562.0 | 576.2 | -298.5 | 594.3 | 475.8 | 0.73 |
| | CO_01 | CBOG1 | 266.7 | 256.3 | 298.2 | -4.4 | 313.4 | 256.2 | 10.71 |
| | CO_178 | CBOSA | 276.0 | 265.5 | 306.0 | -13.8 | 321.4 | 265.1 | 16.85 |
| | CO_28 | CBSOL | 493.0 | 486.1 | 504.4 | -412.3 | 519.0 | 257.0 | 1.07 |
| | CO_179 | CBUCF | 34.7 | 26.8 | 158.4 | -22.4 | 166.9 | 14.7 | 51.76 |
| | CO_17 | CCALA | 386.6 | 376.4 | 403.5 | -152.4 | 419.9 | 344.1 | 1.76 |
| | CO_180 | CCARV | 264.7 | 254.2 | 296.5 | -10.2 | 311.7 | 254.0 | 16.39 |
| | CO_12 | CCHIN | 258.0 | 247.6 | 291.4 | 36.5 | 306.2 | 245.2 | 3.51 |
| | CO_181 | CCKEN | 271.8 | 261.3 | 302.4 | -4.4 | 317.8 | 261.3 | 7.66 |
| | CO_49 | CCOLO | 428.2 | 417.7 | 441.0 | -15.0 | 458.2 | 417.5 | 5.91 |
| | CO_182 | CCORP | 255.7 | 245.2 | 288.9 | -11.6 | 304.1 | 244.9 | 25.80 |
| | CO_64 | CCRUZ | 727.6 | 717.1 | 725.4 | -142.5 | 746.1 | 702.6 | 1.41 |
| | CO_42 | CCUC2 | 136.2 | 125.7 | 198.9 | -4.7 | 212.0 | 125.6 | 48.04 |
| | CO_121 | CCUC3 | 132.7 | 122.2 | 196.8 | -5.1 | 209.8 | 122.1 | 27.28 |
| | CO_141 | CCUFI | 784.3 | 773.7 | 780.4 | -165.5 | 801.6 | 755.7 | 0.14 |
| | CO_168 | CCUMB | 842.4 | 831.9 | 836.5 | -199.6 | 858.5 | 807.4 | 0.16 |
| | CO_183 | CDABE | 358.0 | 352.7 | 381.6 | -331.5 | 393.3 | 120.5 | 6.58 |
| | CO_184 | CEING | 250.9 | 240.4 | 285.0 | -7.8 | 300.1 | 240.3 | 25.92 |
| | CO_07 | CFILA | 330.2 | 320.7 | 353.4 | -184.5 | 368.6 | 262.3 | 2.15 |
| | CO_185 | CFLOD | 261.6 | 251.1 | 293.8 | -15.2 | 309.1 | 250.6 | 22.08 |
| | CO_186 | CFONT | 268.2 | 257.7 | 299.4 | -11.8 | 314.7 | 257.5 | 10.50 |
| | CO_152 | CGIR2 | 32.3 | 26.7 | 158.3 | -25.9 | 166.3 | 6.4 | 60.69 |
| | CO_13 | CGUAD | 260.6 | 250.2 | 292.3 | -75.8 | 307.5 | 238.4 | 14.44 |
| | CO_161 | CGUYA | 316.9 | 307.2 | 342.4 | -162.6 | 357.6 | 260.5 | 5.02 |
| | CO_187 | CJABO | 265.2 | 254.7 | 296.9 | -7.5 | 312.2 | 254.6 | 13.64 |
| | CO_156 | CMACA | 523.7 | 513.4 | 530.9 | 140.0 | 548.3 | 494.5 | 2.30 |
| | CO_51 | CMAN1 | 338.9 | 329.1 | 361.1 | -169.6 | 376.6 | 281.9 | 17.76 |
| | CO_188 | CMARI | 281.5 | 271.0 | 310.7 | -1.7 | 326.1 | 271.0 | 11.46 |
| | CO_88 | CMONT | 388.9 | 385.7 | 411.2 | -381.7 | 421.3 | 54.9 | 11.74 |
| | CO_69 | CNEIV | 496.5 | 486.0 | 504.5 | -40.9 | 522.4 | 484.2 | 3.04 |
| | CO_189 | CNINO | 262.0 | 251.5 | 294.2 | -8.3 | 309.4 | 251.3 | 12.12 |
| | CO_122 | CNOCA | 248.7 | 239.0 | 282.7 | -127.8 | 297.2 | 201.9 | 19.50 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20150310205544 | CO_162 | CORTC | 405.7 | 395.1 | 420.1 | -85.2 | 437.0 | 385.8 | 5.17 |
| | CO_169 | CPALC | 420.6 | 411.1 | 434.8 | -237.0 | 451.0 | 335.8 | 3.64 |
| | CO_130 | CPALE | 337.5 | 327.7 | 359.8 | -164.9 | 375.4 | 283.1 | 10.43 |
| | CO_172 | CPAM2 | 69.9 | 59.5 | 169.2 | 1.5 | 179.9 | 59.5 | 23.47 |
| | CO_158 | CPAM3 | 74.1 | 63.7 | 169.5 | 3.7 | 180.4 | 63.7 | 7.85 |
| | CO_38 | CPAMP | 77.1 | 66.6 | 170.7 | 5.8 | 181.6 | 66.5 | 23.99 |
| | CO_70 | CPAS1 | 786.0 | 775.4 | 781.8 | -161.2 | 803.1 | 758.3 | 0.09 |
| | CO_137 | CPGA1 | 267.5 | 257.0 | 298.8 | -5.6 | 314.1 | 256.9 | 11.97 |
| | CO_163 | CPIZC | 524.9 | 516.0 | 532.7 | -347.3 | 549.4 | 381.3 | 0.94 |
| | CO_19 | CPLA1 | 223.4 | 215.5 | 263.9 | -169.9 | 276.6 | 132.6 | 10.66 |
| | CO_72 | CPLAT | 586.1 | 575.6 | 589.5 | -77.5 | 608.4 | 570.3 | 1.19 |
| | CO_142 | CPROV | 1175.2 | 1171.2 | 1165.6 | -1141.7 | 1186.3 | 259.0 | 0.42 |
| | CO_190 | CPSUB | 256.8 | 246.4 | 289.9 | -8.2 | 305.1 | 246.2 | 7.47 |
| | CO_14 | CQUET | 288.9 | 278.5 | 316.7 | 32.6 | 332.0 | 276.8 | 3.28 |
| | CO_124 | CREAC | 267.8 | 257.3 | 299.1 | -4.8 | 314.4 | 257.3 | 12.14 |
| | CO_165 | CRECR | 331.3 | 321.3 | 355.1 | -146.8 | 370.7 | 285.7 | 11.57 |
| | CO_144 | CRIO2 | 337.7 | 328.4 | 360.4 | -204.6 | 375.4 | 256.9 | 2.27 |
| | CO_03 | CROSA | 261.0 | 250.4 | 293.5 | -38.3 | 308.8 | 247.5 | 13.95 |
| | CO_173 | CSAMU | 424.5 | 416.1 | 439.2 | -302.3 | 454.4 | 285.7 | 3.95 |
| | CO_85 | CSARD | 144.0 | 133.6 | 204.0 | -42.9 | 217.3 | 126.5 | 28.50 |
| | CO_170 | CSJAC | 423.5 | 417.1 | 440.3 | -367.9 | 453.7 | 196.4 | 4.55 |
| | CO_84 | CSJGU | 472.1 | 462.9 | 483.9 | 243.0 | 499.3 | 395.2 | 7.99 |
| | CO_191 | CSMOR | 277.9 | 267.5 | 307.7 | -10.1 | 323.2 | 267.3 | 9.08 |
| | CO_46 | CSONS | 287.1 | 278.1 | 316.5 | -179.1 | 330.9 | 212.6 | 11.94 |
| | CO_151 | CSTM1 | 507.1 | 498.2 | 515.9 | -334.8 | 532.4 | 368.7 | 2.14 |
| | CO_159 | CTAME | 136.3 | 134.1 | 205.8 | 135.8 | 212.1 | 13.3 | 6.29 |
| | CO_192 | CTEJE | 270.1 | 259.7 | 301.1 | -4.6 | 316.4 | 259.6 | 10.23 |
| | CO_193 | CTIEM | 265.5 | 255.0 | 297.1 | -14.4 | 312.4 | 254.5 | 23.81 |
| | CO_126 | CTUM2 | 842.1 | 831.9 | 835.7 | -332.6 | 857.6 | 761.9 | 3.88 |
| | CO_123 | CTUN3 | 142.0 | 131.6 | 204.7 | 23.2 | 217.6 | 129.9 | 9.33 |
| | CO_194 | CTUNA | 282.4 | 272.0 | 311.6 | -3.0 | 327.0 | 272.0 | 9.19 |
| | CO_195 | CTVCA | 259.3 | 248.9 | 292.1 | -8.5 | 307.2 | 248.7 | 12.63 |
| | CO_196 | CUAGR | 254.0 | 243.6 | 287.6 | -6.9 | 302.7 | 243.5 | 18.58 |
| | CO_197 | CUNMA | 265.4 | 255.0 | 297.2 | -1.8 | 312.4 | 255.0 | 9.86 |
| | CO_129 | CURIB | 558.5 | 548.1 | 563.0 | -142.2 | 581.6 | 529.2 | 0.58 |
| | CO_198 | CUSAL | 252.7 | 242.2 | 286.5 | -4.5 | 301.6 | 242.2 | 15.96 |
| | CO_199 | CUSAQ | 257.9 | 247.5 | 290.8 | -2.8 | 306.0 | 247.4 | 24.68 |
| | CO_153 | CVALL | 416.5 | 406.7 | 430.7 | -208.0 | 447.1 | 349.4 | 5.40 |
| | CO_04 | CVHER | 306.1 | 296.0 | 331.9 | -127.0 | 347.3 | 267.3 | 10.33 |
| | CO_200 | CVITE | 272.8 | 262.3 | 303.4 | -0.2 | 318.7 | 262.3 | 7.52 |
| | CO_127 | CYOPA | 168.3 | 160.9 | 223.6 | 126.2 | 233.9 | 102.6 | 3.57 |
| | CO_139 | CYOTO | 485.1 | 474.9 | 494.3 | -198.6 | 511.8 | 431.3 | 0.39 |
| | CO_201 | MHOSP | 337.8 | 328.0 | 360.1 | -166.9 | 375.7 | 282.3 | 22.83 |
| | CO_202 | RNOR1 | 155.9 | 145.4 | 211.8 | -1.4 | 225.3 | 145.4 | 19.20 |
| | CO_203 | RNOR2 | 174.0 | 163.5 | 223.9 | -16.0 | 237.9 | 162.7 | 18.22 |
| | CO_204 | RNOR3 | 131.5 | 121.1 | 196.1 | -0.1 | 209.1 | 121.1 | 29.10 |
| CO_20150322222737 | CO_59 | CARBE | 316.5 | 314.1 | 348.2 | 200.9 | 353.5 | 242.7 | 0.60 |
| | CO_60 | CARME | 373.0 | 370.4 | 398.2 | 114.1 | 404.9 | 352.8 | 0.89 |
| | CO_27 | CBMAL | 557.1 | 554.4 | 569.2 | 93.0 | 578.5 | 546.8 | 0.10 |
| | CO_01 | CBOG1 | 260.4 | 258.2 | 300.5 | 177.3 | 304.9 | 189.2 | 1.08 |
| | CO_28 | CBSOL | 474.7 | 471.9 | 491.0 | -134.5 | 499.7 | 452.3 | 0.14 |
| | CO_155 | CCNEG | 304.0 | 302.1 | 337.5 | 248.5 | 342.2 | 173.9 | 0.95 |
| | CO_64 | CCRUZ | 717.9 | 715.4 | 724.1 | 357.8 | 735.3 | 619.8 | 0.17 |
| | CO_42 | CCUC2 | 143.0 | 140.2 | 207.8 | -81.9 | 211.9 | 113.8 | 6.01 |
| | CO_121 | CCUC3 | 139.4 | 136.7 | 205.6 | -79.9 | 209.6 | 110.9 | 13.57 |
| | CO_141 | CCUFI | 774.4 | 771.8 | 778.8 | 374.1 | 790.7 | 675.2 | 0.02 |
| | CO_13 | CGUAD | 249.7 | 247.1 | 290.1 | 111.2 | 295.0 | 221.5 | 1.75 |
| | CO_161 | CGUYA | 302.4 | 299.8 | 336.0 | 58.8 | 342.0 | 294.3 | 0.68 |
| | CO_156 | CMACA | 522.4 | 520.6 | 537.5 | 441.1 | 545.3 | 278.6 | 0.18 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20150322222737 | CO_51 | CMAN1 | 324.6 | 321.9 | 354.9 | 67.2 | 361.1 | 315.2 | 2.46 |
| | CO_122 | CNOCA | 234.3 | 231.6 | 276.7 | 47.9 | 281.8 | 227.0 | 2.50 |
| | CO_77 | COCAN | 162.2 | 160.3 | 222.2 | -153.8 | 225.9 | 45.4 | 7.08 |
| | CO_162 | CORTC | 395.9 | 393.4 | 419.0 | 198.6 | 425.7 | 340.4 | 0.41 |
| | CO_169 | CPALC | 405.4 | 402.7 | 427.2 | 50.2 | 434.6 | 399.8 | 0.88 |
| | CO_172 | CPAM2 | 78.3 | 75.5 | 175.0 | -34.6 | 177.9 | 67.1 | 2.57 |
| | CO_70 | CPAS1 | 776.2 | 773.6 | 780.3 | 379.0 | 792.3 | 674.5 | 0.01 |
| | CO_163 | CPIZC | 508.4 | 505.8 | 522.9 | -5.0 | 531.8 | 505.8 | 0.09 |
| | CO_19 | CPLA1 | 205.8 | 203.0 | 253.8 | -28.9 | 258.8 | 201.0 | 1.45 |
| | CO_142 | CPROV | 1159.6 | 1157.4 | 1152.1 | -1038.2 | 1170.0 | 507.2 | 0.04 |
| | CO_165 | CRECR | 317.9 | 315.2 | 350.0 | 87.1 | 355.9 | 303.4 | 1.64 |
| | CO_03 | CROSA | 252.4 | 250.0 | 293.8 | 145.7 | 298.3 | 204.3 | 1.10 |
| | CO_85 | CSARD | 145.9 | 143.4 | 210.1 | -111.7 | 214.0 | 89.9 | 1.34 |
| | CO_45 | CSLUI | 216.8 | 214.2 | 262.3 | 0.6 | 267.4 | 214.2 | 1.33 |
| | CO_151 | CSTM1 | 500.5 | 498.9 | 516.4 | -491.2 | 524.3 | 87.5 | 0.49 |
| | CO_159 | CTAME | 154.8 | 152.5 | 216.9 | 98.0 | 220.1 | 118.1 | 1.00 |
| | CO_123 | CTUN3 | 139.5 | 137.7 | 208.9 | 117.2 | 211.4 | 74.8 | 1.21 |
| | CO_129 | CURIB | 560.6 | 558.1 | 572.4 | -446.6 | 581.9 | 334.2 | 0.08 |
| | CO_153 | CVALL | 413.6 | 411.6 | 435.0 | -381.5 | 442.2 | 154.3 | 0.80 |
| | CO_04 | CVHER | 293.1 | 290.5 | 327.4 | 90.4 | 333.0 | 276.6 | 1.49 |
| | CO_139 | CYOTO | 472.1 | 469.5 | 489.5 | 140.9 | 497.5 | 448.2 | 0.04 |
| | CO_202 | RNOR1 | 163.0 | 160.2 | 221.6 | -92.1 | 226.0 | 131.1 | 1.30 |
| | CO_203 | RNOR2 | 179.6 | 176.9 | 233.3 | -114.3 | 238.0 | 134.9 | 1.55 |
| | CO_204 | RNOR3 | 138.9 | 136.1 | 205.2 | -75.4 | 209.2 | 113.3 | 4.09 |
| CO_20151014074719 | CO_60 | CARME | 433.3 | 430.4 | 444.7 | -389.0 | 452.0 | 183.7 | 0.69 |
| | CO_211 | CBARI | 119.0 | 115.3 | 171.2 | -41.8 | 175.6 | 107.4 | 14.54 |
| | CO_206 | CBET2 | 597.3 | 593.9 | 601.3 | -458.2 | 610.8 | 377.3 | 0.07 |
| | CO_01 | CBOG1 | 346.6 | 343.1 | 363.1 | -228.9 | 370.1 | 255.4 | 1.39 |
| | CO_28 | CBSOL | 481.7 | 479.6 | 491.1 | -475.4 | 498.2 | 63.2 | 0.23 |
| | CO_210 | CCAPU | 461.6 | 458.2 | 470.7 | -346.3 | 478.9 | 299.7 | 0.69 |
| | CO_155 | CCNEG | 396.7 | 393.1 | 409.3 | -217.4 | 417.0 | 327.3 | 1.14 |
| | CO_64 | CCRUZ | 789.6 | 786.4 | 788.8 | -668.4 | 800.2 | 412.8 | 0.21 |
| | CO_42 | CCUC2 | 92.1 | 90.9 | 156.2 | 92.3 | 157.4 | 12.7 | 3.95 |
| | CO_141 | CCUFI | 844.7 | 841.6 | 842.9 | -724.6 | 854.8 | 426.1 | 0.01 |
| | CO_168 | CCUMB | 900.3 | 897.3 | 897.3 | -786.5 | 909.8 | 429.7 | 0.02 |
| | CO_65 | CFLOR | 724.5 | 721.0 | 724.6 | -539.0 | 735.6 | 477.8 | 0.06 |
| | CO_205 | CGAR2 | 655.5 | 652.0 | 657.9 | -492.6 | 668.1 | 426.3 | 0.32 |
| | CO_161 | CGUYA | 356.0 | 353.2 | 372.9 | -327.7 | 379.2 | 131.6 | 0.40 |
| | CO_50 | CIBA1 | 416.9 | 413.7 | 428.8 | -352.7 | 436.3 | 216.1 | 0.47 |
| | CO_156 | CMACA | 616.0 | 612.4 | 619.0 | -331.9 | 629.1 | 514.2 | 0.27 |
| | CO_51 | CMAN1 | 378.4 | 375.7 | 393.3 | -349.0 | 400.0 | 138.9 | 1.91 |
| | CO_88 | CMONT | 309.7 | 306.1 | 328.1 | -191.1 | 334.8 | 239.0 | 2.10 |
| | CO_207 | CNIZA | 376.5 | 373.7 | 391.5 | -344.9 | 398.2 | 143.7 | 0.42 |
| | CO_122 | CNOCA | 291.0 | 288.1 | 311.9 | -259.9 | 317.9 | 124.2 | 2.24 |
| | CO_77 | COCAN | 64.8 | 61.5 | 141.3 | 27.8 | 144.0 | 56.1 | 25.22 |
| | CO_162 | CORTC | 469.7 | 466.5 | 478.7 | -381.0 | 486.8 | 268.7 | 0.45 |
| | CO_172 | CPAM2 | 73.7 | 70.6 | 147.7 | 43.3 | 150.3 | 57.5 | 3.04 |
| | CO_158 | CPAM3 | 75.9 | 72.8 | 147.7 | 48.0 | 150.3 | 56.8 | 3.49 |
| | CO_70 | CPAS1 | 846.8 | 843.7 | 844.8 | -724.2 | 856.8 | 431.1 | 0.01 |
| | CO_71 | CPAS2 | 841.0 | 837.9 | 839.0 | -716.6 | 851.0 | 432.4 | 0.03 |
| | CO_163 | CPIZC | 540.6 | 538.6 | 547.7 | -535.6 | 555.4 | 56.7 | 0.09 |
| | CO_142 | CPROV | 1087.9 | 1084.2 | 1079.5 | -482.9 | 1095.3 | 968.8 | 0.06 |
| | CO_208 | CPTAR | 501.8 | 499.1 | 509.8 | -467.3 | 517.7 | 174.8 | 0.80 |
| | CO_124 | CREAC | 347.6 | 344.0 | 364.0 | -230.0 | 371.1 | 255.7 | 1.23 |
| | CO_03 | CROSA | 332.9 | 329.4 | 350.7 | -242.3 | 357.5 | 223.1 | 0.67 |
| | CO_212 | CSJUR | 247.8 | 244.7 | 273.0 | -213.8 | 278.6 | 119.0 | 14.20 |
| | CO_151 | CSTM1 | 403.3 | 400.0 | 415.9 | 87.4 | 423.0 | 390.8 | 0.45 |
| | CO_159 | CTAME | 213.8 | 210.5 | 244.4 | 87.3 | 249.0 | 192.5 | 0.36 |
| | CO_126 | CTUM2 | 885.3 | 882.6 | 882.2 | -830.8 | 894.4 | 296.2 | 0.01 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20151014074719 | CO_129 | CURIB | 471.6 | 468.8 | 481.3 | 331.4 | 488.5 | 333.6 | 0.21 |
| | CO_153 | CVALL | 317.2 | 313.9 | 336.2 | 148.4 | 341.9 | 277.9 | 2.15 |
| | CO_04 | CVHER | 355.3 | 352.3 | 371.4 | -311.6 | 378.1 | 164.1 | 0.74 |
| | CO_98 | RAC02 | 596.5 | 593.6 | 601.0 | -535.1 | 610.1 | 256.3 | 0.19 |

## Resultados para sismos de la zona Benioff

**Tabla I. 3** Variables geométricas para cada registro de eventos en la zona de Benioff

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19950208184027 | CO_06 | CANSE | 159.7 | 148.2 | 165.9 | 7.3 | 180.2 | 148.2 | 38.07 |
| | CO_16 | CBETA | 194.4 | 189.6 | 206.4 | 185.9 | 211.0 | 53.8 | 2.98 |
| | CO_01 | CBOG1 | 284.0 | 275.2 | 287.0 | 207.9 | 296.1 | 184.9 | 7.61 |
| | CO_17 | CCALA | 116.7 | 106.6 | 132.3 | 66.9 | 143.4 | 86.1 | 49.16 |
| | CO_18 | CDAGU | 45.1 | 33.6 | 82.5 | 10.7 | 94.0 | 33.0 | 53.26 |
| | CO_07 | CFILA | 178.6 | 167.1 | 183.1 | 28.8 | 197.0 | 165.2 | 8.07 |
| | CO_10 | CNORC | 253.5 | 242.2 | 253.3 | 80.8 | 266.4 | 229.7 | 5.51 |
| | CO_02 | CPENS | 216.9 | 205.6 | 219.3 | 62.8 | 232.5 | 197.0 | 31.13 |
| | CO_19 | CPLA1 | 308.6 | 297.1 | 305.2 | 33.5 | 319.5 | 295.7 | 6.18 |
| | CO_20 | CPOP1 | 179.4 | 168.7 | 185.9 | 86.8 | 197.7 | 147.1 | 4.00 |
| | CO_21 | CPOP2 | 175.8 | 165.3 | 182.9 | 88.5 | 194.5 | 142.1 | 16.16 |
| | CO_22 | CPRAD | 188.8 | 183.9 | 201.0 | 179.7 | 205.7 | 54.5 | 5.43 |
| | CO_08 | CRIOS | 180.8 | 169.3 | 184.7 | 7.1 | 199.0 | 169.3 | 12.39 |
| | CO_03 | CROSA | 264.8 | 255.4 | 268.0 | 173.4 | 278.0 | 191.1 | 3.53 |
| | CO_23 | CSAL1 | 122.9 | 112.0 | 135.8 | 50.8 | 148.1 | 101.8 | 8.49 |
| | CO_24 | CSEVI | 74.5 | 65.4 | 101.7 | 51.6 | 111.6 | 44.9 | 67.38 |
| | CO_15 | CSRA1 | 295.6 | 286.8 | 298.0 | 213.1 | 307.4 | 196.3 | 3.19 |
| | CO_09 | CTADO | 136.9 | 125.5 | 145.1 | -64.4 | 159.3 | 107.8 | 64.77 |
| | CO_25 | CTRUJ | 33.9 | 23.2 | 79.6 | 16.5 | 89.6 | 19.6 | 91.34 |
| | CO_26 | CTUTU | 189.9 | 178.6 | 192.4 | -89.9 | 206.7 | 154.3 | 127.19 |
| | CO_04 | CVHER | 194.9 | 184.1 | 199.9 | 86.5 | 212.1 | 164.6 | 3.54 |
| CO_19950819214333 | CO_05 | CANDE | 75.0 | 65.6 | 137.8 | -63.0 | 150.0 | 18.6 | 63.99 |
| | CO_06 | CANSE | 35.0 | 30.3 | 125.6 | -30.3 | 135.0 | 0.0 | 126.17 |
| | CO_16 | CBETA | 264.5 | 252.3 | 281.2 | 163.3 | 294.3 | 197.7 | 3.10 |
| | CO_27 | CBMAL | 230.3 | 215.8 | 245.2 | -92.3 | 263.7 | 195.0 | 10.75 |
| | CO_01 | CBOG1 | 170.5 | 164.9 | 209.5 | 167.4 | 215.0 | 37.1 | 2.00 |
| | CO_28 | CBSOL | 241.0 | 236.2 | 262.9 | -236.2 | 273.1 | 0.0 | 3.56 |
| | CO_29 | CBUC1 | 352.4 | 338.6 | 358.5 | 107.4 | 375.4 | 323.2 | 2.89 |
| | CO_19 | CPLA1 | 150.6 | 136.4 | 181.4 | -14.2 | 198.6 | 135.6 | 50.94 |
| | CO_09 | CTADO | 112.9 | 103.7 | 158.0 | -99.0 | 171.1 | 30.9 | 9.52 |
| | CO_26 | CTUTU | 132.4 | 127.7 | 174.4 | -127.7 | 184.5 | 0.0 | 9.63 |
| CO_19960911062847 | CO_05 | CANDE | 177.8 | 176.3 | 208.4 | 175.0 | 210.5 | 36.2 | 3.30 |
| | CO_06 | CANSE | 142.7 | 141.9 | 181.0 | 144.3 | 182.1 | 2.4 | 5.73 |
| | CO_30 | CBUEN | 68.6 | 65.4 | 126.9 | -60.7 | 130.6 | 24.5 | 9.79 |
| | CO_17 | CCALA | 105.4 | 102.7 | 151.9 | 88.8 | 154.5 | 55.6 | 4.84 |
| | CO_31 | CCALI | 77.5 | 73.8 | 132.1 | -60.5 | 136.3 | 42.2 | 11.21 |
| | CO_18 | CDAGU | 62.7 | 60.0 | 125.1 | -58.3 | 128.5 | 14.4 | 7.32 |
| | CO_32 | CECAL | 34.3 | 31.0 | 114.6 | -28.3 | 117.7 | 12.8 | 4.32 |
| | CO_33 | CFLAN | 114.5 | 112.2 | 158.8 | 105.4 | 161.0 | 44.9 | 15.21 |
| | CO_34 | CPER2 | 112.6 | 110.9 | 157.4 | 109.8 | 159.2 | 27.6 | 8.82 |
| | CO_35 | CPTEJ | 107.7 | 103.8 | 150.6 | -77.7 | 155.5 | 68.8 | 7.23 |
| | CO_36 | CROLD | 44.9 | 43.0 | 119.4 | 44.0 | 121.3 | 11.2 | 5.73 |
| | CO_23 | CSAL1 | 140.4 | 137.1 | 174.9 | -122.5 | 179.8 | 61.5 | 1.30 |
| | CO_25 | CTRUJ | 22.6 | 19.4 | 112.4 | 17.4 | 114.8 | 12.3 | 9.29 |
| CO_19970219182514 | CO_05 | CANDE | 146.3 | 140.9 | 174.7 | -132.0 | 181.7 | 49.2 | 12.22 |
| | CO_16 | CBETA | 227.9 | 221.4 | 243.8 | 49.6 | 251.7 | 216.8 | 1.81 |
| | CO_28 | CBSOL | 220.2 | 213.1 | 235.3 | -49.8 | 244.5 | 207.2 | 1.57 |
| | CO_30 | CBUEN | 92.9 | 91.3 | 140.5 | 96.1 | 141.2 | 0.0 | 44.28 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19970219182514 | CO_31 | CCALI | 109.4 | 103.9 | 149.1 | 80.4 | 153.2 | 71.3 | 27.63 |
| | CO_49 | CCOLO | 221.8 | 214.7 | 237.1 | -52.7 | 246.3 | 208.2 | 4.15 |
| | CO_18 | CDAGU | 94.9 | 90.5 | 140.3 | 84.0 | 143.3 | 43.6 | 23.10 |
| | CO_32 | CECAL | 66.7 | 61.7 | 123.3 | 55.0 | 126.7 | 35.8 | 14.83 |
| | CO_07 | CFILA | 135.2 | 131.9 | 167.7 | -131.9 | 173.0 | 0.0 | 1.43 |
| | CO_33 | CFLAN | 97.2 | 91.3 | 138.9 | -82.4 | 145.5 | 39.4 | 31.29 |
| | CO_50 | CIBA1 | 136.9 | 130.1 | 166.1 | -96.2 | 174.1 | 87.5 | 5.35 |
| | CO_51 | CMAN1 | 124.4 | 120.2 | 159.2 | -119.4 | 165.0 | 13.8 | 1.43 |
| | CO_44 | CMAZP | 93.6 | 88.3 | 136.5 | -84.2 | 142.6 | 26.6 | 93.46 |
| | CO_02 | CPENS | 177.3 | 173.3 | 201.7 | -172.7 | 207.8 | 15.1 | 10.47 |
| | CO_52 | CPER1 | 77.1 | 72.3 | 126.8 | -70.8 | 132.3 | 14.7 | 9.57 |
| | CO_34 | CPER2 | 90.9 | 85.9 | 135.0 | -83.2 | 140.9 | 21.6 | 55.57 |
| | CO_19 | CPLA1 | 263.3 | 259.2 | 277.4 | -257.4 | 284.3 | 30.4 | 2.59 |
| | CO_21 | CPOP2 | 225.0 | 219.5 | 243.6 | 163.7 | 249.6 | 151.4 | 3.83 |
| | CO_35 | CPTEJ | 139.0 | 133.2 | 170.8 | 91.7 | 175.6 | 100.9 | 22.80 |
| | CO_53 | CPUTP | 93.2 | 88.0 | 136.4 | -84.2 | 142.5 | 25.5 | 24.53 |
| | CO_54 | CRICA | 400.4 | 396.6 | 408.0 | 372.2 | 414.6 | 149.1 | 2.44 |
| | CO_08 | CRIOS | 134.3 | 130.1 | 166.4 | -129.0 | 172.4 | 16.5 | 2.00 |
| | CO_36 | CROLD | 31.8 | 24.6 | 107.6 | -15.4 | 112.4 | 19.3 | 23.81 |
| | CO_55 | CSAMA | 370.9 | 366.6 | 379.5 | 329.7 | 386.3 | 169.6 | 2.47 |
| | CO_24 | CSEVI | 64.2 | 56.9 | 119.1 | -24.5 | 125.5 | 51.4 | 13.17 |
| | CO_46 | CSONS | 183.8 | 180.1 | 207.5 | -179.9 | 213.5 | 8.5 | 2.24 |
| | CO_56 | CTOCH | 103.7 | 97.2 | 143.5 | 35.6 | 149.6 | 92.2 | 6.13 |
| | CO_57 | CTORI | 171.8 | 165.7 | 197.4 | 102.3 | 203.0 | 134.0 | 4.68 |
| | CO_25 | CTRUJ | 33.0 | 26.4 | 108.3 | 10.4 | 112.6 | 25.8 | 18.33 |
| | CO_58 | CTUMA | 388.4 | 386.2 | 397.7 | 388.5 | 402.7 | 43.5 | 1.80 |
| | CO_234 | CTUMA_R | 388.4 | 386.2 | 397.7 | 388.5 | 402.7 | 43.5 | 0.32 |
| | CO_26 | CTUTU | 141.4 | 134.3 | 168.6 | -84.8 | 176.9 | 104.1 | 15.81 |
| CO_19970902121325 | CO_05 | CANDE | 199.7 | 194.4 | 289.9 | 205.4 | 294.5 | 13.4 | 10.40 |
| | CO_59 | CARBE | 150.1 | 132.8 | 245.5 | 13.8 | 263.3 | 132.7 | 1.89 |
| | CO_60 | CARME | 76.3 | 68.7 | 222.0 | 79.6 | 229.5 | 9.0 | 58.82 |
| | CO_16 | CBETA | 134.0 | 126.0 | 240.9 | -126.0 | 253.8 | 0.0 | 0.98 |
| | CO_61 | CBOG2 | 202.4 | 184.9 | 278.3 | 41.7 | 297.2 | 182.4 | 4.34 |
| | CO_62 | CBORD | 239.6 | 221.4 | 300.5 | -147.8 | 322.6 | 164.7 | 15.43 |
| | CO_29 | CBUC1 | 461.6 | 445.7 | 490.0 | 282.4 | 509.6 | 353.8 | 2.28 |
| | CO_63 | CBUC2 | 460.8 | 445.0 | 489.3 | 282.5 | 508.9 | 352.7 | 3.94 |
| | CO_40 | CBUIS | 464.5 | 448.8 | 492.7 | 291.1 | 512.2 | 350.8 | 5.21 |
| | CO_17 | CCALA | 71.6 | 63.2 | 220.4 | 73.7 | 228.2 | 11.2 | 13.26 |
| | CO_31 | CCALI | 96.7 | 78.3 | 220.9 | -11.9 | 236.6 | 77.4 | 41.82 |
| | CO_49 | CCOLO | 117.3 | 99.3 | 228.7 | -70.5 | 245.5 | 69.9 | 8.11 |
| | CO_64 | CCRUZ | 290.0 | 272.7 | 340.0 | -208.0 | 362.7 | 176.2 | 21.29 |
| | CO_41 | CCUC1 | 570.4 | 554.7 | 587.3 | 354.5 | 609.7 | 435.5 | 2.45 |
| | CO_18 | CDAGU | 110.8 | 93.5 | 226.8 | 10.9 | 242.7 | 93.5 | 21.45 |
| | CO_32 | CECAL | 91.8 | 74.3 | 221.2 | 31.4 | 235.0 | 71.6 | 5.44 |
| | CO_07 | CFILA | 159.3 | 150.7 | 261.6 | 157.1 | 268.8 | 38.9 | 2.36 |
| | CO_33 | CFLAN | 91.2 | 82.8 | 227.7 | 92.5 | 235.3 | 17.1 | 72.41 |
| | CO_65 | CFLOR | 254.9 | 244.0 | 316.5 | -241.3 | 333.7 | 35.7 | 1.51 |
| | CO_66 | CFQNE | 283.6 | 266.5 | 339.0 | 126.6 | 357.4 | 240.4 | 1.45 |
| | CO_13 | CGUAD | 183.3 | 167.0 | 268.5 | 105.9 | 283.3 | 137.8 | 1.32 |
| | CO_50 | CIBA1 | 84.3 | 68.6 | 220.6 | 56.5 | 232.1 | 51.8 | 4.29 |
| | CO_67 | CIBA2 | 85.4 | 70.1 | 220.3 | 60.3 | 231.6 | 50.4 | 1.19 |
| | CO_68 | CIPIA | 398.2 | 380.4 | 428.5 | -273.1 | 453.8 | 264.6 | 3.17 |
| | CO_51 | CMAN1 | 136.1 | 126.8 | 248.5 | 132.5 | 256.3 | 37.8 | 55.55 |
| | CO_44 | CMAZP | 101.2 | 94.1 | 231.9 | 104.7 | 238.8 | 12.7 | 26.52 |
| | CO_69 | CNEIV | 115.9 | 105.5 | 231.1 | -105.2 | 244.6 | 7.2 | 2.67 |
| | CO_70 | CPAS1 | 346.8 | 329.1 | 385.4 | -238.7 | 409.6 | 226.3 | 1.62 |
| | CO_71 | CPAS2 | 341.1 | 323.5 | 380.5 | -238.2 | 404.6 | 218.6 | 5.67 |
| | CO_02 | CPENS | 180.3 | 168.1 | 272.1 | 156.3 | 282.2 | 85.4 | 10.16 |
| | CO_52 | CPER1 | 101.7 | 97.5 | 233.3 | 109.0 | 238.9 | 0.0 | 8.38 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19970902121325 | CO_34 | CPER2 | 104.1 | 97.6 | 233.5 | 108.6 | 240.0 | 9.4 | 30.12 |
| | CO_19 | CPLA1 | 282.7 | 270.9 | 345.1 | 247.4 | 355.7 | 133.0 | 2.94 |
| | CO_72 | CPLAT | 166.7 | 153.7 | 256.4 | -147.9 | 272.9 | 41.5 | 2.71 |
| | CO_20 | CPOP1 | 189.2 | 171.4 | 267.5 | -124.1 | 287.6 | 118.1 | 5.95 |
| | CO_21 | CPOP2 | 184.2 | 166.4 | 264.5 | -121.7 | 284.4 | 113.4 | 12.51 |
| | CO_22 | CPRAD | 94.4 | 75.4 | 219.3 | -27.4 | 235.1 | 70.3 | 1.65 |
| | CO_35 | CPTEJ | 104.2 | 85.3 | 223.4 | -43.3 | 239.8 | 73.4 | 29.22 |
| | CO_53 | CPUTP | 102.0 | 94.9 | 232.4 | 105.7 | 239.2 | 12.2 | 23.59 |
| | CO_08 | CRIOS | 172.6 | 165.6 | 271.1 | 175.1 | 277.0 | 26.1 | 5.21 |
| | CO_36 | CROLD | 78.8 | 69.6 | 222.2 | 79.0 | 230.4 | 17.2 | 11.41 |
| | CO_03 | CROSA | 190.2 | 172.9 | 272.3 | 75.0 | 289.3 | 160.8 | 42.53 |
| | CO_73 | CSAGU | 229.9 | 214.7 | 296.2 | -192.6 | 315.8 | 94.9 | 1.12 |
| | CO_24 | CSEVI | 48.1 | 43.3 | 214.5 | 54.8 | 221.8 | 0.0 | 25.30 |
| | CO_45 | CSLUI | 252.1 | 239.8 | 320.9 | 216.0 | 331.6 | 125.2 | 1.88 |
| | CO_46 | CSONS | 205.5 | 195.2 | 290.5 | 191.8 | 299.0 | 74.8 | 5.92 |
| | CO_74 | CSTRC | 112.5 | 104.4 | 236.9 | 113.6 | 244.1 | 21.5 | 35.60 |
| | CO_48 | CSVIC | 279.0 | 269.1 | 344.8 | 261.8 | 353.7 | 98.8 | 4.24 |
| | CO_56 | CTOCH | 48.4 | 29.5 | 209.6 | -9.3 | 221.8 | 28.0 | 4.90 |
| | CO_57 | CTORI | 120.3 | 102.7 | 231.1 | -77.5 | 247.9 | 67.3 | 9.72 |
| | CO_25 | CTRUJ | 75.7 | 61.7 | 218.9 | 61.1 | 229.2 | 36.8 | 14.96 |
| | CO_26 | CTUTU | 226.8 | 221.1 | 307.9 | 231.8 | 312.5 | 19.7 | 15.03 |
| | CO_04 | CVHER | 145.6 | 131.9 | 250.2 | 116.5 | 261.3 | 79.9 | 1.28 |
| | CO_11 | CVIL1 | 234.8 | 216.9 | 296.9 | -15.2 | 318.6 | 216.4 | 1.23 |
| CO_19971211075630 | CO_39 | CANAP | 155.7 | 144.2 | 228.6 | 16.7 | 241.7 | 143.8 | 2.39 |
| | CO_05 | CANDE | 190.9 | 185.8 | 261.2 | 187.1 | 266.4 | 45.1 | 8.73 |
| | CO_62 | CBORD | 243.6 | 231.5 | 290.1 | -137.6 | 306.1 | 186.2 | 10.39 |
| | CO_29 | CBUC1 | 458.6 | 447.6 | 479.3 | 222.1 | 494.7 | 392.3 | 1.00 |
| | CO_75 | CBUC3 | 454.0 | 443.0 | 475.0 | 223.5 | 490.3 | 386.3 | 3.36 |
| | CO_76 | CBUC4 | 451.2 | 440.3 | 472.5 | 224.6 | 487.7 | 382.5 | 1.83 |
| | CO_30 | CBUEN | 142.1 | 130.7 | 221.1 | 49.2 | 232.8 | 123.6 | 21.91 |
| | CO_40 | CBUIS | 461.3 | 450.4 | 481.9 | 231.1 | 497.2 | 390.5 | 2.83 |
| | CO_31 | CCALI | 96.0 | 83.9 | 197.2 | -13.3 | 208.7 | 82.9 | 42.44 |
| | CO_49 | CCOLO | 126.1 | 115.4 | 211.9 | -93.6 | 224.0 | 67.5 | 2.59 |
| | CO_64 | CCRUZ | 295.1 | 283.5 | 333.0 | -195.9 | 349.5 | 204.9 | 17.40 |
| | CO_41 | CCUC1 | 567.3 | 556.3 | 579.1 | 283.7 | 596.6 | 482.2 | 1.05 |
| | CO_18 | CDAGU | 107.7 | 96.3 | 202.9 | 11.2 | 214.4 | 96.2 | 18.68 |
| | CO_07 | CFILA | 151.6 | 144.4 | 233.0 | 136.1 | 239.9 | 64.5 | 2.68 |
| | CO_33 | CFLAN | 83.8 | 76.3 | 197.5 | 74.6 | 204.3 | 35.0 | 84.56 |
| | CO_66 | CFQNE | 282.7 | 271.2 | 324.3 | 81.3 | 338.9 | 260.8 | 0.96 |
| | CO_50 | CIBA1 | 82.1 | 70.8 | 193.5 | 34.6 | 203.0 | 65.1 | 5.85 |
| | CO_67 | CIBA2 | 82.7 | 71.5 | 193.0 | 38.6 | 202.4 | 64.1 | 1.40 |
| | CO_68 | CIPIA | 402.8 | 390.9 | 425.7 | -249.7 | 444.1 | 300.6 | 3.03 |
| | CO_51 | CMAN1 | 128.9 | 121.1 | 219.5 | 111.8 | 226.7 | 60.4 | 68.48 |
| | CO_44 | CMAZP | 93.3 | 86.6 | 201.4 | 87.3 | 207.8 | 32.1 | 32.50 |
| | CO_69 | CNEIV | 125.9 | 120.5 | 214.4 | -120.4 | 223.6 | 1.1 | 2.36 |
| | CO_77 | COCAN | 549.1 | 539.0 | 563.3 | 353.0 | 579.6 | 412.8 | 3.08 |
| | CO_70 | CPAS1 | 351.4 | 339.6 | 380.7 | -220.3 | 398.3 | 258.4 | 1.40 |
| | CO_71 | CPAS2 | 345.9 | 334.1 | 375.7 | -220.7 | 393.2 | 250.7 | 6.77 |
| | CO_02 | CPENS | 174.5 | 165.2 | 246.3 | 129.6 | 255.4 | 110.6 | 9.19 |
| | CO_52 | CPER1 | 92.8 | 88.1 | 202.2 | 93.6 | 207.5 | 15.3 | 13.89 |
| | CO_34 | CPER2 | 95.9 | 89.6 | 202.9 | 91.6 | 209.0 | 29.3 | 48.20 |
| | CO_72 | CPLAT | 174.6 | 165.6 | 242.3 | -152.7 | 254.7 | 63.9 | 2.08 |
| | CO_20 | CPOP1 | 193.7 | 182.0 | 254.0 | -119.7 | 268.6 | 137.0 | 4.11 |
| | CO_21 | CPOP2 | 188.8 | 177.1 | 250.6 | -117.9 | 265.1 | 132.0 | 15.82 |
| | CO_78 | CPOP3 | 184.8 | 173.1 | 248.0 | -116.7 | 262.4 | 127.8 | 13.22 |
| | CO_22 | CPRAD | 101.3 | 89.1 | 198.9 | -50.9 | 210.7 | 73.2 | 1.00 |
| | CO_35 | CPTEJ | 106.6 | 94.3 | 201.7 | -45.0 | 213.8 | 82.8 | 45.67 |
| | CO_53 | CPUTP | 94.0 | 87.4 | 201.9 | 88.3 | 208.2 | 31.8 | 27.45 |
| | CO_54 | CRICA | 391.1 | 378.9 | 414.3 | -190.4 | 432.9 | 327.4 | 2.82 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19971211075630 | CO_03 | CROSA | 190.1 | 178.6 | 253.5 | 39.8 | 266.9 | 175.5 | 39.29 |
| | CO_24 | CSEVI | 38.1 | 35.9 | 184.5 | 42.8 | 189.8 | 0.0 | 28.58 |
| | CO_45 | CSLUI | 246.2 | 237.0 | 298.1 | 184.0 | 307.8 | 157.4 | 1.50 |
| | CO_46 | CSONS | 198.6 | 190.4 | 264.4 | 166.2 | 272.5 | 104.3 | 5.37 |
| | CO_74 | CSTRC | 104.9 | 97.7 | 206.9 | 95.1 | 213.6 | 42.0 | 54.18 |
| | CO_56 | CTOCH | 49.9 | 37.5 | 183.3 | -16.8 | 192.5 | 33.6 | 7.53 |
| | CO_57 | CTORI | 125.2 | 113.6 | 211.8 | -79.7 | 224.3 | 80.9 | 12.04 |
| | CO_25 | CTRUJ | 66.9 | 58.1 | 190.1 | 54.2 | 197.4 | 33.8 | 14.83 |
| | CO_26 | CTUTU | 216.9 | 214.7 | 281.8 | 221.5 | 284.7 | 0.0 | 14.44 |
| | CO_04 | CVHER | 140.9 | 130.8 | 224.1 | 90.8 | 233.7 | 100.2 | 0.93 |
| CO_20010922032339 | CO_01 | CBOG1 | 221.5 | 214.0 | 275.4 | 2.0 | 285.9 | 214.0 | 1.05 |
| | CO_235 | CBOG1_R | 221.5 | 214.0 | 275.4 | 2.0 | 285.9 | 214.0 | 0.20 |
| | CO_17 | CCALA | 77.8 | 71.6 | 190.8 | 55.4 | 196.2 | 50.3 | 11.45 |
| | CO_31 | CCALI | 78.3 | 70.5 | 188.5 | -10.0 | 195.7 | 69.8 | 18.70 |
| | CO_18 | CDAGU | 90.4 | 82.9 | 193.6 | 15.0 | 200.8 | 82.2 | 8.32 |
| | CO_32 | CECAL | 70.8 | 63.5 | 187.1 | 31.8 | 193.2 | 57.3 | 1.92 |
| | CO_07 | CFILA | 163.1 | 157.6 | 237.1 | 133.4 | 242.8 | 90.6 | 0.73 |
| | CO_50 | CIBA1 | 99.4 | 91.9 | 198.2 | 32.0 | 205.3 | 87.7 | 2.58 |
| | CO_51 | CMAN1 | 141.2 | 135.4 | 223.4 | 109.3 | 229.2 | 85.7 | 17.73 |
| | CO_71 | CPAS2 | 331.1 | 323.5 | 364.8 | -211.5 | 377.4 | 244.7 | 2.68 |
| | CO_72 | CPLAT | 165.6 | 160.0 | 235.8 | -150.0 | 244.1 | 55.6 | 1.06 |
| | CO_89 | CPMGU | 322.4 | 314.7 | 357.4 | -204.2 | 369.8 | 239.4 | 4.10 |
| | CO_90 | CSAEL | 374.6 | 367.3 | 404.1 | 156.1 | 415.4 | 334.5 | 1.53 |
| | CO_25 | CTRUJ | 58.6 | 54.5 | 184.9 | 55.8 | 189.0 | 18.3 | 6.28 |
| | CO_04 | CVHER | 156.6 | 149.6 | 231.4 | 86.9 | 238.8 | 124.8 | 0.39 |
| CO_20050308155943 | CO_06 | CANSE | 95.3 | 94.4 | 114.0 | 93.0 | 115.4 | 20.7 | 9.32 |
| | CO_17 | CCALA | 37.4 | 34.6 | 72.0 | 8.0 | 74.9 | 33.8 | 19.43 |
| | CO_18 | CDAGU | 118.9 | 116.4 | 131.5 | -75.9 | 135.1 | 88.2 | 3.25 |
| | CO_32 | CECAL | 89.8 | 87.1 | 107.0 | -52.2 | 110.6 | 69.7 | 1.07 |
| | CO_07 | CFILA | 106.9 | 105.3 | 123.0 | 94.7 | 125.0 | 48.1 | 0.78 |
| | CO_67 | CIBA2 | 77.4 | 74.6 | 96.5 | 0.9 | 100.1 | 74.6 | 1.24 |
| | CO_105 | CIBA3 | 84.7 | 81.8 | 102.6 | -4.8 | 106.3 | 81.7 | 2.87 |
| | CO_51 | CMAN1 | 87.8 | 85.9 | 107.1 | 70.2 | 109.5 | 50.8 | 9.62 |
| | CO_117 | CPOST | 35.6 | 32.9 | 71.0 | 12.8 | 73.8 | 30.7 | 61.90 |
| | CO_92 | CSHEL | 202.0 | 200.8 | 210.7 | 192.2 | 212.5 | 61.4 | 0.47 |
| | CO_56 | CTOCH | 89.3 | 88.0 | 107.8 | -85.6 | 110.3 | 20.3 | 2.39 |
| | CO_25 | CTRUJ | 46.5 | 43.7 | 76.3 | -17.4 | 79.5 | 40.0 | 6.26 |
| | CO_26 | CTUTU | 162.0 | 160.8 | 172.3 | 153.9 | 173.9 | 49.8 | 1.97 |
| | CO_97 | CVERS | 33.5 | 31.1 | 70.7 | 20.8 | 73.2 | 24.0 | 89.40 |
| | CO_106 | MCOLO | 87.4 | 85.5 | 106.8 | 70.3 | 109.2 | 50.0 | 22.33 |
| | CO_107 | MEMTE | 87.5 | 85.4 | 106.7 | 66.7 | 109.2 | 54.6 | 7.45 |
| | CO_108 | MPALE | 99.3 | 97.0 | 116.1 | 64.1 | 118.9 | 73.6 | 4.88 |
| | CO_118 | RAC01 | 136.8 | 134.7 | 147.8 | -113.6 | 151.1 | 72.3 | 2.36 |
| | CO_98 | RAC02 | 132.5 | 130.4 | 144.0 | -109.2 | 147.2 | 71.3 | 2.81 |
| | CO_110 | RAC03 | 114.1 | 112.7 | 128.3 | -108.8 | 130.9 | 29.4 | 7.60 |
| | CO_111 | RAC04 | 131.9 | 129.7 | 143.5 | -106.5 | 146.8 | 74.0 | 5.09 |
| | CO_99 | RAC05 | 127.9 | 125.7 | 139.8 | -102.7 | 143.1 | 72.6 | 5.57 |
| | CO_112 | RAC06 | 127.9 | 125.7 | 139.8 | -103.5 | 143.1 | 71.3 | 4.51 |
| | CO_100 | RAC07 | 124.0 | 121.8 | 136.3 | -98.6 | 139.7 | 71.4 | 5.70 |
| | CO_119 | RAC09 | 118.2 | 116.0 | 131.2 | -93.9 | 134.5 | 68.1 | 4.82 |
| CO_20050421033924 | CO_06 | CANSE | 58.7 | 54.9 | 117.2 | -6.5 | 121.1 | 54.5 | 10.57 |
| | CO_60 | CARME | 83.5 | 81.1 | 131.1 | -78.7 | 134.6 | 19.6 | 8.45 |
| | CO_17 | CCALA | 89.4 | 87.2 | 135.0 | -85.0 | 138.6 | 19.2 | 2.40 |
| | CO_07 | CFILA | 84.8 | 80.9 | 131.0 | -20.0 | 135.5 | 78.3 | 0.78 |
| | CO_51 | CMAN1 | 83.3 | 79.4 | 130.5 | -42.0 | 135.0 | 67.3 | 9.02 |
| | CO_02 | CPENS | 130.9 | 126.9 | 163.3 | -39.7 | 168.5 | 120.6 | 11.52 |
| | CO_08 | CRIOS | 77.7 | 74.0 | 127.1 | 1.6 | 131.3 | 74.0 | 1.05 |
| | CO_45 | CSLUI | 184.9 | 181.2 | 206.8 | -1.2 | 212.4 | 181.2 | 1.13 |
| | CO_25 | CTRUJ | 86.5 | 83.0 | 132.1 | -63.1 | 136.4 | 53.9 | 3.81 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20050421033924 | CO_26 | CTUTU | 88.9 | 87.2 | 135.0 | 86.0 | 136.9 | 23.8 | 12.14 |
| | CO_97 | CVERS | 47.4 | 44.4 | 112.8 | -39.8 | 116.1 | 19.7 | 19.21 |
| | CO_04 | CVHER | 127.6 | 123.7 | 160.9 | -73.7 | 165.9 | 99.4 | 1.03 |
| | CO_120 | CVICT | 60.4 | 58.3 | 118.0 | -57.5 | 121.2 | 9.3 | 2.30 |
| | CO_106 | MCOLO | 82.5 | 78.6 | 130.1 | -41.6 | 134.5 | 66.7 | 16.65 |
| | CO_107 | MEMTE | 87.1 | 83.2 | 132.9 | -47.1 | 137.4 | 68.6 | 10.45 |
| | CO_110 | RAC03 | 176.8 | 173.6 | 200.6 | -145.5 | 205.7 | 94.7 | 3.65 |
| | CO_111 | RAC04 | 180.8 | 177.2 | 203.8 | -119.3 | 209.3 | 130.9 | 3.15 |
| | CO_99 | RAC05 | 176.7 | 173.0 | 200.1 | -116.8 | 205.6 | 127.6 | 2.94 |
| | CO_100 | RAC07 | 172.5 | 168.8 | 196.6 | -114.1 | 202.1 | 124.5 | 4.22 |
| CO_20080913093201 | CO_06 | CANSE | 61.7 | 59.7 | 147.4 | -59.0 | 152.1 | 9.1 | 16.77 |
| | CO_59 | CARBE | 134.3 | 129.9 | 186.6 | 95.0 | 193.0 | 89.7 | 1.00 |
| | CO_29 | CBUC1 | 370.5 | 364.9 | 385.1 | -157.6 | 395.5 | 329.0 | 0.96 |
| | CO_17 | CCALA | 33.7 | 30.0 | 138.4 | 26.8 | 143.0 | 15.5 | 10.62 |
| | CO_121 | CCUC3 | 477.6 | 472.0 | 485.7 | -223.0 | 497.0 | 415.9 | 1.82 |
| | CO_18 | CDAGU | 182.6 | 177.2 | 221.1 | 79.8 | 229.0 | 158.7 | 4.56 |
| | CO_32 | CECAL | 153.6 | 148.0 | 199.2 | 60.9 | 206.9 | 135.4 | 1.51 |
| | CO_07 | CFILA | 56.5 | 54.8 | 145.2 | -54.4 | 149.8 | 6.1 | 4.22 |
| | CO_51 | CMAN1 | 32.1 | 30.2 | 138.6 | -30.0 | 143.0 | 3.2 | 14.58 |
| | CO_77 | COCAN | 453.7 | 448.7 | 463.8 | -289.4 | 474.4 | 342.7 | 4.25 |
| | CO_34 | CPER2 | 22.6 | 16.9 | 135.5 | -8.2 | 140.3 | 14.9 | 46.98 |
| | CO_19 | CPLA1 | 178.5 | 174.2 | 218.4 | -138.0 | 225.7 | 106.3 | 3.08 |
| | CO_117 | CPOST | 31.2 | 26.8 | 137.4 | 21.4 | 142.1 | 17.5 | 48.97 |
| | CO_35 | CPTEJ | 200.3 | 195.7 | 236.2 | 135.3 | 243.3 | 142.5 | 9.09 |
| | CO_03 | CROSA | 132.6 | 126.8 | 185.4 | 35.9 | 193.0 | 122.0 | 1.67 |
| | CO_45 | CSLUI | 148.8 | 144.2 | 195.4 | -107.2 | 202.6 | 96.4 | 3.80 |
| | CO_25 | CTRUJ | 109.6 | 103.9 | 169.5 | 33.7 | 176.7 | 98.7 | 4.78 |
| CO_20090908082601 | CO_06 | CANSE | 113.8 | 111.7 | 141.1 | 74.4 | 143.2 | 84.7 | 1.65 |
| | CO_60 | CARME | 108.3 | 105.9 | 135.5 | -2.9 | 138.7 | 105.9 | 8.60 |
| | CO_17 | CCALA | 112.5 | 110.0 | 138.8 | -8.0 | 142.1 | 109.7 | 1.87 |
| | CO_32 | CECAL | 84.9 | 83.5 | 118.9 | -82.9 | 121.2 | 10.1 | 0.62 |
| | CO_50 | CIBA1 | 156.6 | 154.1 | 175.1 | -12.5 | 178.8 | 153.6 | 0.63 |
| | CO_51 | CMAN1 | 132.1 | 129.7 | 155.5 | 56.1 | 158.3 | 117.8 | 3.83 |
| | CO_97 | CVERS | 47.8 | 45.3 | 96.8 | -4.2 | 99.2 | 45.1 | 25.56 |
| CO_20091218143003 | CO_06 | CANSE | 250.7 | 247.4 | 294.9 | -10.2 | 301.7 | 247.2 | 0.88 |
| | CO_18 | CDAGU | 83.0 | 80.7 | 182.8 | -63.3 | 186.3 | 50.1 | 7.06 |
| | CO_32 | CECAL | 98.0 | 95.1 | 189.8 | -53.6 | 193.8 | 78.5 | 1.65 |
| | CO_78 | CPOP3 | 71.3 | 68.0 | 178.5 | -15.8 | 182.3 | 66.1 | 7.02 |
| | CO_83 | CPOP4 | 76.0 | 72.7 | 180.2 | -19.6 | 184.0 | 70.1 | 7.73 |
| | CO_35 | CPTEJ | 25.3 | 23.3 | 166.1 | -20.1 | 168.7 | 11.7 | 37.65 |
| | CO_55 | CSAMA | 240.9 | 237.8 | 286.9 | -96.2 | 293.4 | 217.4 | 3.00 |
| CO_20100129175223 | CO_06 | CANSE | 69.7 | 67.0 | 148.6 | 30.6 | 151.1 | 60.5 | 3.31 |
| | CO_60 | CARME | 39.1 | 37.5 | 137.8 | 36.5 | 139.3 | 14.1 | 10.10 |
| | CO_17 | CCALA | 44.2 | 42.4 | 139.5 | 39.3 | 141.1 | 19.7 | 7.62 |
| | CO_18 | CDAGU | 136.8 | 134.0 | 186.9 | -92.5 | 190.9 | 96.8 | 1.77 |
| | CO_32 | CECAL | 106.8 | 103.9 | 167.5 | -72.9 | 171.0 | 74.1 | 0.96 |
| | CO_50 | CIBA1 | 87.7 | 86.1 | 158.0 | 81.5 | 159.7 | 32.6 | 0.62 |
| | CO_128 | CMON2 | 458.7 | 456.0 | 469.9 | 29.0 | 477.4 | 455.1 | 0.01 |
| | CO_126 | CTUM2 | 437.5 | 434.9 | 449.8 | -343.2 | 457.1 | 266.9 | 0.07 |
| CO_20100626184014 | CO_65 | CFLOR | 735.4 | 731.8 | 734.3 | -357.4 | 745.3 | 637.9 | 0.05 |
| | CO_71 | CPAS2 | 671.4 | 667.8 | 672.4 | -174.6 | 682.6 | 644.4 | 0.84 |
| | CO_126 | CTUM2 | 757.0 | 753.5 | 755.4 | -34.2 | 766.5 | 752.7 | 0.01 |
| CO_20100812115416 | CO_27 | CBMAL | 582.4 | 565.4 | 600.0 | 455.1 | 624.7 | 345.3 | 0.69 |
| | CO_65 | CFLOR | 361.8 | 356.5 | 415.5 | 363.1 | 426.8 | 30.7 | 0.43 |
| | CO_50 | CIBA1 | 671.1 | 661.3 | 689.8 | 639.6 | 708.5 | 195.0 | 0.60 |
| | CO_128 | CMON2 | 1117.3 | 1102.0 | 1105.2 | 935.6 | 1139.9 | 590.5 | 0.05 |
| | CO_71 | CPAS2 | 271.1 | 254.8 | 333.6 | 218.7 | 354.6 | 143.1 | 0.72 |
| | CO_126 | CTUM2 | 374.9 | 352.1 | 408.1 | 168.7 | 437.8 | 313.1 | 1.61 |
| | CO_129 | CURIB | 1552.4 | 1543.1 | 1528.8 | 1488.9 | 1568.7 | 425.6 | 0.09 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20101009140447 | CO_65 | CFLOR | 495.8 | 492.1 | 502.6 | -296.0 | 511.3 | 392.9 | 0.09 |
| | CO_71 | CPAS2 | 443.8 | 440.1 | 453.5 | -115.7 | 461.7 | 424.5 | 0.12 |
| CO_20110815025319 | CO_65 | CFLOR | 401.7 | 400.6 | 434.5 | 401.1 | 440.7 | 31.7 | 0.07 |
| | CO_71 | CPAS2 | 333.4 | 329.7 | 372.7 | 283.2 | 380.6 | 171.7 | 0.13 |
| | CO_126 | CTUM2 | 444.8 | 439.7 | 469.1 | 269.6 | 480.2 | 348.4 | 0.12 |
| CO_20120930163135 | CO_60 | CARME | 314.6 | 292.8 | 333.0 | -274.2 | 363.3 | 102.7 | 21.86 |
| | CO_16 | CBETA | 144.0 | 113.7 | 199.2 | -67.2 | 231.0 | 91.7 | 1.87 |
| | CO_01 | CBOG1 | 404.5 | 375.2 | 406.2 | -253.2 | 443.8 | 276.8 | 2.98 |
| | CO_28 | CBSOL | 502.9 | 490.4 | 511.0 | -490.4 | 534.2 | 0.0 | 2.55 |
| | CO_17 | CCALA | 310.5 | 288.3 | 329.4 | -268.4 | 359.9 | 105.3 | 5.12 |
| | CO_140 | CCODA | 959.0 | 934.8 | 936.4 | -821.0 | 975.8 | 444.8 | 0.22 |
| | CO_121 | CCUC3 | 798.1 | 770.2 | 777.5 | -577.1 | 818.3 | 508.9 | 0.51 |
| | CO_141 | CCUFI | 126.1 | 97.7 | 197.6 | 57.9 | 223.0 | 88.7 | 3.97 |
| | CO_07 | CFILA | 397.1 | 375.7 | 406.1 | -353.6 | 436.7 | 127.0 | 1.86 |
| | CO_65 | CFLOR | 84.8 | 57.8 | 178.0 | 51.6 | 199.4 | 46.2 | 3.26 |
| | CO_143 | CGENO | 275.3 | 253.9 | 300.2 | -239.9 | 329.8 | 83.1 | 1.98 |
| | CO_136 | CGRAL | 395.7 | 366.5 | 398.3 | -247.5 | 435.8 | 270.2 | 1.89 |
| | CO_51 | CMAN1 | 374.8 | 352.8 | 385.9 | -328.9 | 416.8 | 127.6 | 15.05 |
| | CO_128 | CMON2 | 773.4 | 757.1 | 764.7 | -748.8 | 794.1 | 111.4 | 0.16 |
| | CO_71 | CPAS2 | 118.7 | 90.9 | 193.7 | 61.5 | 217.9 | 79.1 | 13.10 |
| | CO_137 | CPGA1 | 403.5 | 374.3 | 405.3 | -253.4 | 442.9 | 275.4 | 2.60 |
| | CO_89 | CPMGU | 112.2 | 83.9 | 190.1 | 53.2 | 214.6 | 75.6 | 3.67 |
| | CO_21 | CPOP2 | 74.8 | 62.2 | 176.7 | -62.2 | 196.6 | 0.0 | 14.89 |
| | CO_78 | CPOP3 | 76.3 | 64.3 | 177.6 | -64.3 | 197.4 | 0.0 | 14.97 |
| | CO_142 | CPROV | 1397.3 | 1379.6 | 1369.0 | -1349.8 | 1408.8 | 281.0 | 0.09 |
| | CO_124 | CREAC | 403.3 | 374.1 | 405.1 | -252.6 | 442.7 | 275.8 | 2.33 |
| | CO_54 | CRICA | 192.1 | 163.0 | 233.2 | 46.5 | 264.1 | 160.3 | 45.56 |
| | CO_144 | CRIO2 | 407.1 | 386.8 | 416.3 | -369.6 | 446.0 | 113.8 | 2.61 |
| | CO_03 | CROSA | 406.7 | 378.5 | 409.3 | -280.2 | 446.0 | 254.4 | 0.83 |
| | CO_73 | CSAGU | 13.2 | 0.0 | 165.8 | 7.1 | 182.2 | 0.0 | 5.77 |
| | CO_55 | CSAMA | 145.1 | 116.0 | 203.9 | 41.3 | 232.5 | 113.4 | 32.61 |
| | CO_145 | CTULU | 251.7 | 234.4 | 284.1 | -231.8 | 310.0 | 34.7 | 9.35 |
| | CO_58 | CTUMA | 262.8 | 232.6 | 282.1 | -34.3 | 318.6 | 230.0 | 44.20 |
| | CO_26 | CTUTU | 437.1 | 422.5 | 448.0 | -421.5 | 472.7 | 29.0 | 3.94 |
| | CO_129 | CURIB | 1200.7 | 1175.2 | 1169.9 | -987.1 | 1214.1 | 632.8 | 0.12 |
| | CO_04 | CVHER | 383.6 | 359.1 | 391.5 | -315.9 | 424.7 | 170.8 | 1.00 |
| | CO_11 | CVIL1 | 401.6 | 371.0 | 401.4 | -194.0 | 440.3 | 316.2 | 1.05 |
| | CO_139 | CYOTO | 240.7 | 225.2 | 276.8 | -224.6 | 301.2 | 16.8 | 7.49 |
| CO_20130209141608 | CO_27 | CBMAL | 321.1 | 298.8 | 330.0 | -58.4 | 359.7 | 293.1 | 17.45 |
| | CO_01 | CBOG1 | 540.7 | 524.5 | 539.5 | -425.5 | 565.2 | 306.2 | 2.83 |
| | CO_62 | CBORD | 121.6 | 101.6 | 179.1 | -63.8 | 203.4 | 79.1 | 24.09 |
| | CO_17 | CCALA | 426.9 | 407.2 | 429.1 | -253.7 | 457.3 | 318.4 | 3.62 |
| | CO_140 | CCODA | 1074.9 | 1054.4 | 1051.3 | -581.9 | 1087.0 | 876.8 | 0.17 |
| | CO_141 | CCUFI | 15.7 | 8.5 | 151.3 | -8.5 | 166.6 | 0.0 | 4.52 |
| | CO_18 | CDAGU | 293.2 | 271.8 | 306.8 | -120.7 | 335.5 | 243.5 | 16.18 |
| | CO_32 | CECAL | 322.1 | 300.8 | 332.4 | -140.7 | 361.2 | 265.8 | 3.46 |
| | CO_07 | CFILA | 508.5 | 488.1 | 504.8 | -273.7 | 534.2 | 403.9 | 0.97 |
| | CO_143 | CGENO | 390.8 | 371.1 | 395.7 | -232.0 | 423.6 | 289.5 | 2.05 |
| | CO_136 | CGRAL | 532.0 | 515.8 | 531.3 | -419.0 | 556.9 | 300.3 | 1.88 |
| | CO_236 | CGRAL_R | 532.0 | 515.8 | 531.3 | -419.0 | 556.9 | 300.3 | 0.78 |
| | CO_13 | CGUAD | 540.7 | 522.5 | 537.2 | -376.8 | 564.7 | 361.5 | 1.14 |
| | CO_51 | CMAN1 | 488.7 | 468.6 | 486.6 | -274.8 | 515.6 | 379.3 | 14.02 |
| | CO_69 | CNEIV | 314.4 | 300.2 | 331.5 | -265.7 | 354.0 | 139.8 | 3.38 |
| | CO_122 | CNOCA | 570.4 | 550.9 | 564.1 | -354.7 | 593.1 | 421.1 | 0.79 |
| | CO_70 | CPAS1 | 15.3 | 10.5 | 150.6 | -10.5 | 165.7 | 0.0 | 3.41 |
| | CO_71 | CPAS2 | 22.9 | 18.1 | 150.9 | -18.1 | 166.2 | 0.0 | 7.29 |
| | CO_146 | CPAS3 | 20.0 | 15.4 | 150.6 | -15.4 | 165.8 | 0.0 | 16.37 |
| | CO_147 | CPAS4 | 19.6 | 14.5 | 150.5 | -14.5 | 165.8 | 0.0 | 7.02 |
| | CO_148 | CPAS5 | 21.8 | 16.6 | 150.7 | -16.6 | 166.1 | 0.0 | 11.76 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20130209141608 | CO_149 | CPAS6 | 21.0 | 15.0 | 150.5 | -15.0 | 165.8 | 0.0 | 18.10 |
| | CO_150 | CPAS7 | 22.4 | 17.9 | 150.9 | -17.9 | 166.1 | 0.0 | 6.72 |
| | CO_137 | CPGA1 | 539.6 | 523.4 | 538.5 | -424.0 | 564.2 | 306.3 | 2.63 |
| | CO_72 | CPLAT | 220.9 | 207.1 | 252.8 | -186.5 | 274.6 | 89.9 | 3.15 |
| | CO_142 | CPROV | 1429.1 | 1407.1 | 1395.7 | 211.0 | 1438.2 | 1391.6 | 0.13 |
| | CO_35 | CPTEJ | 260.4 | 240.3 | 280.0 | -145.5 | 307.2 | 191.3 | 23.46 |
| | CO_124 | CREAC | 539.5 | 523.3 | 538.4 | -424.5 | 564.1 | 305.5 | 2.78 |
| | CO_54 | CRICA | 62.5 | 57.6 | 161.1 | 63.3 | 174.8 | 0.0 | 33.48 |
| | CO_03 | CROSA | 539.7 | 522.5 | 537.8 | -402.5 | 564.4 | 332.7 | 1.97 |
| | CO_73 | CSAGU | 154.5 | 143.2 | 205.4 | -137.3 | 225.1 | 40.7 | 2.85 |
| | CO_23 | CSAL1 | 218.0 | 197.4 | 245.1 | -108.6 | 272.3 | 164.8 | 8.39 |
| | CO_55 | CSAMA | 28.6 | 11.5 | 149.7 | 16.5 | 166.0 | 3.8 | 33.31 |
| | CO_151 | CSTM1 | 1171.5 | 1150.2 | 1144.8 | -517.0 | 1182.7 | 1025.1 | 0.07 |
| | CO_126 | CTUM2 | 162.5 | 148.7 | 211.5 | 132.7 | 229.5 | 77.3 | 19.12 |
| | CO_58 | CTUMA | 164.0 | 150.3 | 212.6 | 134.5 | 230.5 | 77.3 | 71.42 |
| | CO_04 | CVHER | 505.3 | 486.0 | 503.0 | -318.2 | 531.2 | 367.0 | 0.60 |
| | CO_139 | CYOTO | 340.5 | 319.6 | 348.9 | -166.1 | 377.5 | 273.0 | 5.50 |
| | CO_98 | RAC02 | 269.7 | 249.0 | 287.3 | -135.3 | 315.2 | 209.1 | 26.77 |
| CO_20130827232205 | CO_79 | CBOCA | 163.1 | 160.5 | 174.7 | -50.4 | 178.3 | 152.3 | 0.26 |
| | CO_141 | CCUFI | 288.8 | 286.9 | 295.0 | 216.1 | 298.2 | 190.5 | 0.05 |
| | CO_18 | CDAGU | 9.5 | 7.5 | 71.0 | 7.7 | 72.1 | 4.7 | 17.57 |
| | CO_32 | CECAL | 20.9 | 18.2 | 73.1 | -7.4 | 74.9 | 16.6 | 7.44 |
| | CO_65 | CFLOR | 265.2 | 264.6 | 272.7 | 266.3 | 274.5 | 4.8 | 0.04 |
| | CO_50 | CIBA1 | 178.4 | 176.1 | 188.9 | 3.4 | 192.3 | 176.1 | 0.52 |
| | CO_122 | CNOCA | 285.4 | 282.8 | 289.8 | -89.1 | 294.1 | 268.4 | 0.08 |
| | CO_03 | CROSA | 288.9 | 286.6 | 294.2 | 9.7 | 298.1 | 286.5 | 0.05 |
| | CO_126 | CTUM2 | 311.5 | 309.1 | 315.5 | 87.1 | 319.4 | 297.1 | 0.08 |
| | CO_139 | CYOTO | 46.0 | 43.5 | 82.7 | -6.4 | 85.0 | 43.0 | 12.22 |
| | CO_98 | RAC02 | 43.8 | 43.1 | 83.4 | 44.9 | 83.8 | 1.5 | 6.75 |
| CO_20150221222646 | CO_60 | CARME | 59.0 | 58.4 | 112.7 | 58.0 | 115.2 | 7.2 | 15.29 |
| | CO_27 | CBMAL | 147.3 | 145.5 | 172.9 | -125.1 | 176.7 | 74.3 | 1.95 |
| | CO_01 | CBOG1 | 232.7 | 232.6 | 250.8 | 232.7 | 253.3 | 1.8 | 1.40 |
| | CO_28 | CBSOL | 219.7 | 217.0 | 235.4 | -141.4 | 240.3 | 164.6 | 0.40 |
| | CO_17 | CCALA | 63.7 | 62.9 | 115.2 | 61.8 | 117.9 | 12.3 | 6.91 |
| | CO_64 | CCRUZ | 355.5 | 352.2 | 363.0 | -73.7 | 369.4 | 344.3 | 1.32 |
| | CO_141 | CCUFI | 404.2 | 400.8 | 410.0 | -116.2 | 416.6 | 383.6 | 0.24 |
| | CO_168 | CCUMB | 453.1 | 449.9 | 457.3 | -168.3 | 464.2 | 417.1 | 0.21 |
| | CO_18 | CDAGU | 127.0 | 123.8 | 156.0 | -54.6 | 160.6 | 111.1 | 5.35 |
| | CO_32 | CECAL | 97.1 | 93.9 | 134.1 | -39.2 | 138.5 | 85.4 | 1.84 |
| | CO_65 | CFLOR | 348.2 | 344.8 | 355.3 | 70.5 | 361.7 | 337.5 | 0.17 |
| | CO_164 | CGR1C | 288.0 | 285.7 | 299.1 | -214.0 | 304.1 | 189.2 | 0.06 |
| | CO_125 | CGUAP | 300.2 | 297.4 | 310.1 | -181.2 | 315.6 | 235.9 | 6.25 |
| | CO_161 | CGUYA | 107.8 | 105.7 | 144.0 | 86.0 | 147.7 | 61.5 | 0.51 |
| | CO_156 | CMACA | 381.8 | 379.4 | 388.4 | 268.8 | 394.1 | 267.7 | 0.24 |
| | CO_51 | CMAN1 | 85.8 | 83.9 | 128.0 | 71.0 | 131.4 | 44.7 | 7.29 |
| | CO_69 | CNEIV | 217.2 | 214.2 | 233.1 | 107.4 | 238.2 | 185.3 | 1.53 |
| | CO_122 | CNOCA | 175.9 | 173.9 | 197.3 | 141.5 | 201.4 | 101.1 | 0.81 |
| | CO_162 | CORTC | 133.7 | 131.6 | 161.8 | 106.5 | 165.7 | 77.4 | 1.68 |
| | CO_169 | CPALC | 28.6 | 25.5 | 99.0 | -12.3 | 102.2 | 22.4 | 16.54 |
| | CO_130 | CPALE | 87.4 | 85.7 | 129.1 | 74.9 | 132.5 | 41.7 | 3.77 |
| | CO_70 | CPAS1 | 407.3 | 404.0 | 412.8 | -113.4 | 419.5 | 387.7 | 0.10 |
| | CO_71 | CPAS2 | 402.9 | 399.5 | 408.4 | -106.1 | 415.1 | 385.1 | 0.28 |
| | CO_163 | CPIZC | 134.8 | 134.1 | 163.6 | -131.8 | 166.4 | 24.9 | 3.04 |
| | CO_72 | CPLAT | 255.9 | 252.5 | 268.4 | 39.2 | 274.2 | 249.4 | 1.04 |
| | CO_54 | CRICA | 433.9 | 430.8 | 438.2 | -188.6 | 445.0 | 387.2 | 3.25 |
| | CO_03 | CROSA | 206.9 | 206.4 | 227.2 | 205.2 | 230.0 | 23.5 | 0.41 |
| | CO_55 | CSAMA | 402.6 | 399.3 | 407.9 | -143.8 | 414.6 | 372.5 | 3.11 |
| | CO_173 | CSAMU | 110.8 | 107.7 | 143.1 | -52.0 | 147.6 | 94.3 | 12.63 |
| | CO_151 | CSTM1 | 753.5 | 750.1 | 750.2 | 188.0 | 759.8 | 726.0 | 0.00 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20150221222646 | CO_159 | CTAME | 523.8 | 522.4 | 527.1 | 477.7 | 532.9 | 211.1 | 0.02 |
| | CO_126 | CTUM2 | 424.4 | 421.7 | 429.2 | -271.9 | 435.4 | 322.2 | 0.13 |
| | CO_129 | CURIB | 907.4 | 904.4 | 901.9 | 428.3 | 912.7 | 795.4 | 0.04 |
| | CO_139 | CYOTO | 78.6 | 75.2 | 121.6 | -15.6 | 126.0 | 73.5 | 6.89 |
| | CO_98 | RAC02 | 149.5 | 146.1 | 173.9 | -33.8 | 179.0 | 142.1 | 3.78 |
| CO_20150222125624 | CO_60 | CARME | 223.2 | 218.1 | 263.2 | 48.9 | 271.2 | 212.9 | 3.64 |
| | CO_27 | CBMAL | 170.4 | 166.1 | 221.7 | -119.9 | 228.7 | 114.9 | 2.02 |
| | CO_62 | CBORD | 87.2 | 82.2 | 170.6 | -38.3 | 176.5 | 72.7 | 5.47 |
| | CO_28 | CBSOL | 401.7 | 396.7 | 419.3 | -178.6 | 429.7 | 354.1 | 0.17 |
| | CO_17 | CCALA | 220.0 | 214.9 | 260.8 | 53.4 | 268.7 | 208.5 | 1.10 |
| | CO_64 | CCRUZ | 138.9 | 133.7 | 201.3 | -22.3 | 208.3 | 131.8 | 4.13 |
| | CO_141 | CCUFI | 192.1 | 186.9 | 239.7 | -57.3 | 247.6 | 177.9 | 0.63 |
| | CO_168 | CCUMB | 247.9 | 242.9 | 284.4 | -102.7 | 292.9 | 220.0 | 1.40 |
| | CO_18 | CDAGU | 106.0 | 101.0 | 180.2 | -44.0 | 186.5 | 90.9 | 3.51 |
| | CO_65 | CFLOR | 157.8 | 154.1 | 214.1 | 118.6 | 219.7 | 100.0 | 0.35 |
| | CO_164 | CGR1C | 188.6 | 187.4 | 237.7 | -187.4 | 242.5 | 3.5 | 0.75 |
| | CO_125 | CGUAP | 155.8 | 153.3 | 212.5 | -146.9 | 218.0 | 43.8 | 6.25 |
| | CO_161 | CGUYA | 303.7 | 298.6 | 332.5 | 63.3 | 341.5 | 292.2 | 0.11 |
| | CO_156 | CMACA | 300.7 | 300.3 | 333.4 | 301.7 | 337.3 | 0.0 | 0.05 |
| | CO_51 | CMAN1 | 282.7 | 277.6 | 313.5 | 51.4 | 322.2 | 273.0 | 1.09 |
| | CO_122 | CNOCA | 363.0 | 358.0 | 384.5 | 111.0 | 394.0 | 340.8 | 0.09 |
| | CO_162 | CORTC | 190.7 | 186.2 | 237.7 | 108.8 | 244.4 | 152.1 | 0.30 |
| | CO_169 | CPALC | 243.3 | 238.1 | 278.8 | -26.8 | 287.4 | 236.6 | 1.88 |
| | CO_70 | CPAS1 | 194.5 | 189.3 | 241.1 | -53.8 | 249.0 | 181.5 | 0.26 |
| | CO_71 | CPAS2 | 189.0 | 183.8 | 236.6 | -47.1 | 244.5 | 177.7 | 0.85 |
| | CO_163 | CPIZC | 266.7 | 261.9 | 298.7 | -144.9 | 307.3 | 218.2 | 0.29 |
| | CO_78 | CPOP3 | 28.5 | 23.4 | 152.7 | -0.8 | 157.0 | 23.4 | 3.96 |
| | CO_03 | CROSA | 336.7 | 332.2 | 362.6 | 187.2 | 370.9 | 275.4 | 0.06 |
| | CO_159 | CTAME | 664.2 | 660.0 | 669.8 | 422.9 | 681.6 | 507.2 | 0.01 |
| | CO_126 | CTUM2 | 268.0 | 264.3 | 300.7 | -221.2 | 308.3 | 144.7 | 0.96 |
| | CO_166 | CTUM3 | 269.7 | 266.1 | 302.2 | -222.9 | 309.8 | 145.2 | 0.73 |
| | CO_139 | CYOTO | 140.5 | 135.3 | 201.0 | -12.1 | 208.1 | 134.7 | 1.80 |
| | CO_98 | RAC02 | 71.7 | 66.5 | 163.8 | -18.1 | 169.4 | 64.0 | 2.90 |

## Resultados para eventos interplaca (subducción)

**Tabla I. 4** Variables geométricas para cada registro de eventos en la zona de interplaca

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_19980804185920 | CO_64 | CCRUZ | 433.46 | 400.65 | 400.99 | 223.92 | 434.41 | 351.09 | 4.51 |
| | CO_18 | CDAGU | 614.65 | 581.21 | 580.51 | 142.09 | 615.23 | 570.45 | 0.60 |
| | CO_07 | CFILA | 836.17 | 802.79 | 801.13 | 171.06 | 836.62 | 790.34 | 0.32 |
| | CO_54 | CRICA | 317.87 | 284.47 | 285.37 | 138.14 | 319.02 | 263.55 | 12.09 |
| | CO_58 | CTUMA | 318.44 | 286.00 | 286.73 | 33.75 | 319.49 | 285.99 | 5.17 |
| | CO_234 | CTUMA_R | 318.44 | 286.00 | 286.73 | 33.75 | 319.49 | 285.99 | 2.63 |
| CO_20001108070000 | CO_01 | CBOG1 | 490.58 | 473.94 | 473.74 | 149.93 | 491.16 | 454.21 | 1.14 |
| | CO_235 | CBOG1_R | 490.58 | 473.94 | 473.74 | 149.93 | 491.16 | 454.21 | 0.10 |
| | CO_28 | CBSOL | 108.98 | 90.47 | 91.95 | -26.57 | 111.04 | 86.48 | 82.67 |
| | CO_17 | CCALA | 374.46 | 358.41 | 358.48 | 6.90 | 375.17 | 358.41 | 0.20 |
| | CO_77 | COCAN | 500.67 | 490.08 | 489.71 | 465.12 | 501.18 | 193.17 | 1.16 |
| CO_20030822052915 | CO_94 | CCAL3 | 147.00 | 144.04 | 147.85 | 65.77 | 150.94 | 129.16 | 2.87 |
| | CO_31 | CCALI | 156.41 | 153.41 | 156.87 | 61.52 | 160.05 | 141.41 | 2.66 |
| | CO_18 | CDAGU | 143.53 | 140.48 | 144.30 | 34.01 | 147.49 | 136.79 | 2.72 |
| CO_20041115090656 | CO_59 | CARBE | 317.70 | 301.58 | 301.95 | 332.34 | 318.39 | 39.82 | 1.93 |
| | CO_27 | CBMAL | 69.42 | 33.92 | 40.12 | 42.17 | 72.14 | 32.77 | 79.53 |
| | CO_101 | CCAL5 | 153.56 | 127.45 | 129.22 | 148.23 | 154.94 | 55.34 | 37.71 |
| | CO_102 | CCAL6 | 153.04 | 125.84 | 127.64 | 143.92 | 154.43 | 60.22 | 12.07 |
| | CO_103 | CCAL7 | 164.50 | 136.95 | 138.55 | 152.07 | 165.78 | 68.40 | 17.57 |
| | CO_104 | CCAL8 | 164.42 | 136.69 | 138.29 | 151.23 | 165.70 | 69.31 | 14.99 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20041115090656 | CO_17 | CCALA | 182.96 | 166.17 | 167.54 | 198.51 | 184.20 | 18.83 | 2.57 |
| | CO_32 | CECAL | 114.73 | 94.82 | 97.40 | 127.03 | 116.63 | 15.13 | 14.89 |
| | CO_07 | CFILA | 202.96 | 173.52 | 174.78 | 173.05 | 204.06 | 102.95 | 2.61 |
| | CO_66 | CFQNE | 402.85 | 375.95 | 376.10 | 355.26 | 403.45 | 194.01 | 0.62 |
| | CO_13 | CGUAD | 301.26 | 276.46 | 276.92 | 283.34 | 301.97 | 118.04 | 2.04 |
| | CO_105 | CIBA3 | 232.30 | 215.56 | 216.39 | 247.08 | 233.21 | 28.45 | 2.31 |
| | CO_51 | CMAN1 | 200.20 | 173.63 | 174.98 | 186.32 | 201.38 | 82.21 | 17.54 |
| | CO_69 | CNEIV | 291.06 | 271.90 | 272.32 | 298.24 | 291.75 | 61.64 | 7.51 |
| | CO_71 | CPAS2 | 380.48 | 345.11 | 345.37 | 161.64 | 381.12 | 320.34 | 3.08 |
| | CO_02 | CPENS | 249.14 | 220.08 | 220.99 | 211.59 | 250.08 | 129.09 | 8.21 |
| | CO_72 | CPLAT | 292.28 | 264.33 | 264.84 | 254.72 | 293.00 | 144.50 | 6.63 |
| | CO_89 | CPMGU | 371.71 | 336.36 | 336.68 | 160.37 | 372.38 | 311.43 | 1.19 |
| | CO_21 | CPOP2 | 253.38 | 220.85 | 221.70 | 180.82 | 254.27 | 164.43 | 22.63 |
| | CO_35 | CPTEJ | 182.93 | 155.63 | 156.98 | 168.48 | 184.08 | 77.32 | 22.92 |
| | CO_08 | CRIOS | 193.57 | 162.20 | 163.61 | 152.28 | 194.75 | 110.30 | 2.49 |
| | CO_25 | CTRUJ | 115.09 | 104.95 | 107.26 | 138.36 | 116.98 | 0.00 | 17.05 |
| | CO_97 | CVERS | 118.33 | 102.55 | 105.04 | 135.94 | 120.27 | 2.41 | 49.86 |
| | CO_04 | CVHER | 242.78 | 217.65 | 218.57 | 229.96 | 243.74 | 93.39 | 1.10 |
| | CO_11 | CVIL1 | 406.16 | 389.38 | 389.29 | 417.43 | 406.66 | 64.21 | 1.26 |
| | CO_106 | MCOLO | 199.45 | 172.86 | 174.22 | 185.59 | 200.64 | 81.93 | 11.22 |
| | CO_107 | MEMTE | 203.42 | 177.34 | 178.65 | 191.30 | 204.58 | 80.68 | 7.72 |
| | CO_108 | MPALE | 221.93 | 196.33 | 197.45 | 209.49 | 223.00 | 86.76 | 2.79 |
| | CO_109 | MUNAL | 203.38 | 177.20 | 178.50 | 190.82 | 204.54 | 81.32 | 9.58 |
| | CO_98 | RAC02 | 162.57 | 135.08 | 136.71 | 150.70 | 163.86 | 67.02 | 33.71 |
| | CO_110 | RAC03 | 184.09 | 161.98 | 163.26 | 188.06 | 185.23 | 48.20 | 45.39 |
| | CO_111 | RAC04 | 158.95 | 131.29 | 133.04 | 147.03 | 160.31 | 65.81 | 22.46 |
| | CO_99 | RAC05 | 156.07 | 128.91 | 130.65 | 146.62 | 157.42 | 61.68 | 37.38 |
| | CO_112 | RAC06 | 157.42 | 130.37 | 132.08 | 148.15 | 158.76 | 61.92 | 75.74 |
| | CO_100 | RAC07 | 152.97 | 126.32 | 128.12 | 145.87 | 154.36 | 57.56 | 32.34 |
| | CO_113 | RAC08 | 155.65 | 129.64 | 131.35 | 150.36 | 157.00 | 55.94 | 37.51 |
| | CO_114 | RAC10 | 158.55 | 132.55 | 134.22 | 152.92 | 159.87 | 57.34 | 61.80 |
| | CO_115 | RAC11 | 164.57 | 137.94 | 139.52 | 155.82 | 165.84 | 63.61 | 53.93 |
| CO_20060123205046 | CO_28 | CBSOL | 84.13 | 70.38 | 74.07 | -19.70 | 87.90 | 67.57 | 16.74 |
| | CO_51 | CMAN1 | 317.21 | 305.06 | 305.78 | 42.19 | 318.41 | 303.51 | 2.43 |
| CO_20060124021544 | CO_28 | CBSOL | 75.71 | 70.37 | 74.56 | -35.87 | 80.24 | 60.53 | 7.12 |
| CO_20060129174914 | CO_28 | CBSOL | 71.19 | 66.71 | 68.45 | -19.81 | 73.12 | 63.70 | 3.95 |
| | CO_27 | CBMAL | 132.67 | 112.97 | 120.68 | 65.04 | 139.44 | 97.64 | 5.14 |
| | CO_17 | CCALA | 309.46 | 288.36 | 289.71 | 15.54 | 312.67 | 288.26 | 0.51 |
| | CO_64 | CCRUZ | 195.94 | 189.61 | 191.91 | -189.61 | 201.19 | 0.00 | 47.34 |
| | CO_18 | CDAGU | 158.19 | 136.89 | 139.91 | -4.24 | 164.15 | 136.83 | 4.17 |
| | CO_32 | CECAL | 184.86 | 163.80 | 166.54 | 9.03 | 190.09 | 163.79 | 0.50 |
| | CO_125 | CGUAP | 48.75 | 40.24 | 49.72 | -40.24 | 64.92 | 0.00 | 62.02 |
| | CO_68 | CIPIA | 248.31 | 236.09 | 237.77 | -226.24 | 252.46 | 67.39 | 5.06 |
| | CO_51 | CMAN1 | 356.57 | 335.41 | 337.56 | 64.14 | 359.40 | 330.71 | 1.98 |
| | CO_71 | CPAS2 | 214.77 | 206.68 | 208.70 | -206.25 | 219.53 | 13.23 | 11.46 |
| | CO_72 | CPLAT | 239.63 | 221.50 | 223.08 | -171.28 | 243.62 | 140.42 | 1.72 |
| | CO_89 | CPMGU | 207.42 | 199.88 | 202.03 | -199.75 | 212.39 | 7.00 | 3.58 |
| | CO_21 | CPOP2 | 165.05 | 148.28 | 151.18 | -125.31 | 170.97 | 79.26 | 7.19 |
| | CO_83 | CPOP4 | 164.10 | 147.39 | 150.31 | -124.93 | 170.06 | 78.20 | 10.27 |
| | CO_35 | CPTEJ | 174.96 | 153.36 | 155.98 | -61.93 | 180.37 | 140.30 | 7.19 |
| | CO_54 | CRICA | 198.76 | 183.39 | 185.53 | -163.18 | 203.59 | 83.61 | 33.10 |
| | CO_55 | CSAMA | 190.32 | 179.25 | 181.51 | -175.15 | 195.44 | 38.01 | 44.36 |
| | CO_25 | CTRUJ | 227.74 | 206.56 | 209.29 | 27.37 | 232.00 | 205.67 | 0.98 |
| | CO_126 | CTUM2 | 155.57 | 134.23 | 137.16 | -63.48 | 161.38 | 118.25 | 28.31 |
| | CO_58 | CTUMA | 156.72 | 135.34 | 138.22 | -62.75 | 162.47 | 119.88 | 34.23 |
| CO_20100911185524 | CO_65 | CFLOR | 856.71 | 852.75 | 850.28 | 386.73 | 858.26 | 760.86 | 0.03 |
| | CO_71 | CPAS2 | 719.75 | 715.72 | 714.65 | 222.50 | 721.76 | 681.12 | 0.11 |
| | CO_126 | CTUM2 | 716.60 | 712.65 | 711.27 | 47.82 | 718.44 | 711.26 | 0.02 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20101125041940 | CO_65 | CFLOR | 497.62 | 492.89 | 492.52 | 173.84 | 498.39 | 462.67 | 0.01 |
| | CO_50 | CIBA1 | 694.14 | 689.33 | 688.20 | -57.13 | 694.73 | 686.94 | 0.16 |
| | CO_71 | CPAS2 | 315.00 | 310.26 | 311.11 | 102.93 | 316.42 | 294.11 | 0.07 |
| | CO_126 | CTUM2 | 212.74 | 207.60 | 208.81 | -48.35 | 214.50 | 201.88 | 0.17 |
| CO_20110817080204 | CO_50 | CIBA1 | 296.56 | 293.90 | 294.34 | 215.74 | 297.47 | 202.40 | 0.06 |
| | CO_51 | CMAN1 | 240.89 | 238.61 | 239.47 | 205.46 | 242.09 | 125.77 | 0.18 |
| | CO_122 | CNOCA | 304.78 | 303.05 | 303.37 | 290.43 | 305.61 | 95.13 | 0.02 |
| | CO_71 | CPAS2 | 496.03 | 492.70 | 492.44 | -103.63 | 496.64 | 481.64 | 0.01 |
| CO_20110913043848 | CO_121 | CCUC3 | 610.78 | 607.51 | 606.76 | 490.16 | 610.99 | 363.31 | 0.05 |
| | CO_50 | CIBA1 | 291.62 | 289.56 | 289.71 | 285.02 | 292.12 | 68.97 | 0.15 |
| | CO_51 | CMAN1 | 235.40 | 234.10 | 234.53 | 237.78 | 236.08 | 7.76 | 0.23 |
| | CO_128 | CMON2 | 372.27 | 368.22 | 368.06 | 57.94 | 372.61 | 364.21 | 0.01 |
| | CO_122 | CNOCA | 298.93 | 297.08 | 297.15 | 296.05 | 299.37 | 53.37 | 0.03 |
| | CO_71 | CPAS2 | 496.21 | 492.12 | 491.84 | 147.79 | 496.55 | 470.51 | 0.04 |
| | CO_126 | CTUM2 | 445.66 | 441.57 | 441.22 | -26.87 | 445.93 | 440.75 | 0.01 |
| CO_20110913044935 | CO_121 | CCUC3 | 607.30 | 603.60 | 602.89 | 557.33 | 607.47 | 243.42 | 0.09 |
| | CO_65 | CFLOR | 498.31 | 492.62 | 492.18 | 212.41 | 498.52 | 446.79 | 0.02 |
| | CO_50 | CIBA1 | 287.52 | 283.57 | 283.69 | 258.19 | 287.93 | 128.16 | 0.14 |
| | CO_51 | CMAN1 | 231.14 | 228.15 | 228.53 | 225.95 | 231.71 | 57.89 | 0.75 |
| | CO_128 | CMON2 | 371.54 | 365.80 | 365.63 | 136.16 | 371.81 | 341.53 | 0.01 |
| | CO_122 | CNOCA | 294.72 | 293.01 | 293.05 | 298.26 | 295.08 | 3.78 | 0.07 |
| | CO_126 | CTUM2 | 446.08 | 439.69 | 439.36 | -129.25 | 446.30 | 420.21 | 0.02 |
| | CO_129 | CURIB | 906.88 | 901.69 | 900.04 | 606.55 | 906.98 | 669.91 | 0.00 |
| CO_20120110180712 | CO_65 | CFLOR | 594.96 | 591.88 | 591.18 | 433.27 | 596.20 | 405.85 | 0.01 |
| | CO_70 | CPAS1 | 412.83 | 409.55 | 410.45 | 267.18 | 414.86 | 312.81 | 0.03 |
| | CO_71 | CPAS2 | 420.22 | 416.95 | 417.74 | 273.58 | 422.18 | 317.07 | 0.05 |
| | CO_126 | CTUM2 | 354.35 | 350.72 | 351.75 | 97.57 | 356.39 | 337.72 | 0.11 |
| CO_20140309202955 | CO_27 | CBMAL | 371.22 | 365.02 | 365.21 | 23.99 | 372.19 | 364.57 | 0.12 |
| | CO_140 | CCODA | 1154.72 | 1148.42 | 1144.84 | -47.96 | 1155.03 | 1147.40 | 0.01 |
| | CO_65 | CFLOR | 431.02 | 425.76 | 425.68 | 337.33 | 431.88 | 267.11 | 0.06 |
| | CO_156 | CMACA | 635.58 | 630.00 | 629.02 | 456.19 | 636.15 | 439.94 | 0.38 |
| | CO_122 | CNOCA | 687.17 | 680.82 | 679.64 | 131.46 | 687.71 | 669.06 | 0.05 |
| | CO_70 | CPAS1 | 247.75 | 243.16 | 244.56 | 218.41 | 249.54 | 118.28 | 0.33 |
| | CO_71 | CPAS2 | 254.72 | 250.07 | 251.34 | 222.75 | 256.41 | 124.64 | 0.45 |
| | CO_54 | CRICA | 173.06 | 168.68 | 170.70 | 157.39 | 175.31 | 74.34 | 2.31 |
| | CO_03 | CROSA | 687.84 | 681.46 | 680.52 | 228.67 | 688.48 | 643.77 | 0.04 |
| | CO_159 | CTAME | 1018.94 | 1012.57 | 1009.76 | 337.30 | 1019.30 | 955.93 | 0.00 |
| | CO_139 | CYOTO | 449.06 | 442.69 | 442.59 | 111.94 | 449.93 | 429.78 | 0.06 |
| CO_20140616063932 | CO_27 | CBMAL | 346.80 | 339.68 | 339.52 | 71.76 | 346.90 | 333.38 | 0.13 |
| | CO_141 | CCUFI | 226.92 | 222.98 | 223.23 | 220.88 | 227.24 | 62.12 | 0.47 |
| | CO_161 | CGUYA | 594.70 | 587.55 | 587.24 | 194.31 | 594.82 | 556.63 | 0.04 |
| | CO_156 | CMACA | 613.89 | 608.36 | 607.80 | 510.60 | 613.95 | 340.18 | 0.04 |
| | CO_51 | CMAN1 | 572.23 | 565.08 | 564.72 | 188.64 | 572.33 | 534.85 | 0.29 |
| | CO_122 | CNOCA | 662.19 | 655.05 | 654.41 | 225.48 | 662.25 | 617.18 | 0.02 |
| | CO_70 | CPAS1 | 230.39 | 226.55 | 226.74 | 225.27 | 230.67 | 59.72 | 0.43 |
| | CO_71 | CPAS2 | 237.10 | 233.16 | 233.30 | 230.54 | 237.35 | 65.33 | 0.93 |
| | CO_03 | CROSA | 662.80 | 655.80 | 655.32 | 317.60 | 662.90 | 576.95 | 0.04 |
| | CO_139 | CYOTO | 424.00 | 416.89 | 416.68 | 168.83 | 424.10 | 383.99 | 0.06 |
| | CO_98 | RAC02 | 368.21 | 361.24 | 361.10 | 184.04 | 368.33 | 314.64 | 0.70 |
| CO_20150530062605 | CO_60 | CARME | 570.11 | 565.06 | 564.53 | 170.65 | 570.32 | 539.96 | 0.32 |
| | CO_206 | CBET2 | 488.74 | 484.07 | 483.66 | 302.17 | 488.97 | 381.47 | 0.04 |
| | CO_27 | CBMAL | 397.18 | 392.20 | 391.97 | 46.08 | 397.43 | 389.99 | 0.13 |
| | CO_28 | CBSOL | 606.52 | 601.23 | 600.54 | -91.64 | 606.69 | 594.17 | 0.27 |
| | CO_155 | CCNEG | 725.97 | 721.12 | 720.13 | 381.31 | 726.13 | 614.12 | 0.11 |
| | CO_64 | CCRUZ | 291.13 | 286.98 | 287.22 | 226.22 | 291.63 | 182.16 | 2.23 |
| | CO_141 | CCUFI | 244.56 | 240.82 | 241.31 | 209.19 | 245.23 | 126.88 | 0.25 |
| | CO_168 | CCUMB | 193.55 | 190.41 | 191.11 | 180.93 | 194.35 | 71.68 | 1.05 |
| | CO_65 | CFLOR | 434.77 | 430.73 | 430.43 | 347.55 | 435.01 | 260.26 | 0.09 |
| | CO_205 | CGAR2 | 463.50 | 459.07 | 458.82 | 326.83 | 463.78 | 326.62 | 0.08 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO_20150530062605 | CO_161 | CGUYA | 642.98 | 637.93 | 637.37 | 156.80 | 643.22 | 619.37 | 0.04 |
| | CO_50 | CIBA1 | 599.26 | 594.23 | 593.61 | 216.95 | 599.46 | 554.76 | 0.26 |
| | CO_156 | CMACA | 641.86 | 637.63 | 636.82 | 483.90 | 642.02 | 419.63 | 0.03 |
| | CO_51 | CMAN1 | 620.47 | 615.43 | 614.81 | 152.27 | 620.69 | 597.31 | 0.31 |
| | CO_122 | CNOCA | 710.15 | 705.10 | 704.12 | 184.77 | 710.30 | 681.48 | 0.02 |
| | CO_77 | COCAN | 1042.67 | 1037.65 | 1035.53 | 169.16 | 1042.78 | 1024.27 | 0.02 |
| | CO_162 | CORTC | 564.36 | 559.40 | 558.80 | 247.88 | 564.56 | 503.44 | 0.08 |
| | CO_71 | CPAS2 | 254.56 | 250.84 | 251.19 | 218.67 | 255.11 | 130.59 | 0.52 |
| | CO_163 | CPIZC | 483.42 | 478.47 | 478.05 | -13.01 | 483.63 | 478.29 | 0.05 |
| | CO_165 | CRECR | 625.30 | 620.25 | 619.78 | 175.41 | 625.57 | 596.10 | 0.06 |
| | CO_126 | CTUM2 | 114.12 | 109.09 | 109.97 | 43.85 | 115.01 | 101.76 | 1.85 |
| | CO_166 | CTUM3 | 112.57 | 107.54 | 108.42 | 42.46 | 113.46 | 100.63 | 4.15 |
| | CO_139 | CYOTO | 470.97 | 465.93 | 465.59 | 140.37 | 471.22 | 445.62 | 0.08 |
| | CO_98 | RAC02 | 412.71 | 407.70 | 407.49 | 159.17 | 412.99 | 377.15 | 0.68 |
| CO_20150719111621 | CO_206 | CBET2 | 384.64 | 382.82 | 382.63 | 370.90 | 384.79 | 106.30 | 0.01 |
| | CO_27 | CBMAL | 221.49 | 218.30 | 218.37 | 125.64 | 221.74 | 180.68 | 0.04 |
| | CO_155 | CCNEG | 595.29 | 592.79 | 592.25 | 507.72 | 595.40 | 310.49 | 0.02 |
| | CO_64 | CCRUZ | 251.72 | 250.01 | 250.20 | 245.82 | 252.07 | 60.17 | 0.38 |
| | CO_141 | CCUFI | 240.69 | 238.36 | 238.65 | 215.03 | 241.11 | 109.18 | 0.05 |
| | CO_168 | CCUMB | 233.28 | 230.41 | 230.69 | 173.42 | 233.69 | 155.20 | 0.09 |
| | CO_205 | CGAR2 | 381.62 | 380.26 | 380.16 | 380.51 | 381.82 | 47.00 | 0.02 |
| | CO_161 | CGUYA | 475.47 | 472.35 | 472.19 | 291.98 | 475.68 | 373.49 | 0.01 |
| | CO_156 | CMACA | 563.21 | 561.71 | 561.19 | 556.49 | 563.31 | 96.46 | 0.03 |
| | CO_162 | CORTC | 423.44 | 420.83 | 420.56 | 350.03 | 423.58 | 238.05 | 0.03 |
| | CO_169 | CPALC | 374.59 | 371.38 | 371.21 | 207.36 | 374.75 | 310.10 | 0.03 |
| | CO_70 | CPAS1 | 245.56 | 243.22 | 243.44 | 218.82 | 245.93 | 112.43 | 0.05 |
| | CO_71 | CPAS2 | 249.18 | 246.90 | 247.09 | 225.15 | 249.52 | 108.05 | 0.12 |
| | CO_163 | CPIZC | 298.16 | 294.81 | 294.74 | 91.43 | 298.35 | 281.27 | 0.03 |
| | CO_165 | CRECR | 461.88 | 458.83 | 458.74 | 303.96 | 462.11 | 346.21 | 0.02 |
| | CO_03 | CROSA | 556.76 | 553.91 | 553.58 | 416.90 | 556.92 | 367.77 | 0.02 |
| | CO_126 | CTUM2 | 104.84 | 101.54 | 102.01 | 48.82 | 105.36 | 90.69 | 0.31 |
| | CO_166 | CTUM3 | 104.78 | 101.47 | 101.94 | 47.18 | 105.30 | 91.43 | 2.27 |
| | CO_139 | CYOTO | 312.90 | 310.02 | 309.98 | 231.15 | 313.11 | 209.99 | 0.03 |
| | CO_98 | RAC02 | 269.93 | 267.43 | 267.46 | 231.59 | 270.17 | 139.02 | 0.15 |
| EC_20160416235837 | EC_01 | AAM2 | 193.90 | 153.95 | 160.47 | 212.39 | 198.00 | 28.41 | 27.22 |
| | EC_02 | ACH1 | 386.69 | 319.17 | 320.90 | 185.48 | 388.49 | 293.87 | 22.30 |
| | EC_03 | ACHN | 111.72 | 46.17 | 56.69 | 37.65 | 117.82 | 46.17 | 331.00 |
| | EC_04 | ACUE | 350.15 | 288.71 | 291.38 | 260.63 | 352.43 | 208.56 | 32.20 |
| | EC_05 | AES2 | 90.90 | 13.11 | 24.87 | -4.23 | 98.29 | 12.41 | 119.40 |
| | EC_06 | AGYE | 251.21 | 183.30 | 187.77 | 119.15 | 253.98 | 173.85 | 21.59 |
| | EC_07 | AIB1 | 163.76 | 120.59 | 128.92 | 178.96 | 168.48 | 25.41 | 50.96 |
| | EC_08 | AIB2 | 165.89 | 122.57 | 130.80 | 180.74 | 170.57 | 26.57 | 23.94 |
| | EC_09 | ALAT | 163.19 | 133.30 | 141.02 | 194.39 | 168.07 | 0.00 | 29.10 |
| | EC_10 | ALIB | 303.14 | 237.70 | 239.41 | 40.17 | 305.44 | 237.70 | 37.73 |
| | EC_11 | ALJ1 | 464.89 | 400.26 | 401.38 | 291.28 | 466.57 | 327.25 | 16.00 |
| | EC_12 | ALOR | 149.07 | 82.66 | 92.13 | 59.66 | 153.69 | 82.66 | 23.85 |
| | EC_13 | AMIL | 262.13 | 196.41 | 200.50 | 167.45 | 264.78 | 165.09 | 45.36 |
| | EC_14 | AMNT | 178.01 | 104.13 | 106.07 | -14.58 | 181.90 | 103.11 | 420.91 |
| | EC_15 | AOTA | 148.26 | 110.61 | 119.84 | 171.39 | 153.54 | 8.19 | 41.16 |
| | EC_16 | APED | 53.53 | 0.00 | 21.32 | 1.65 | 65.31 | 0.00 | 875.10 |
| | EC_17 | APO1 | 166.18 | 98.84 | 101.98 | 17.56 | 170.35 | 98.84 | 355.95 |
| | EC_18 | ASDO | 70.98 | 49.71 | 67.17 | 110.80 | 80.52 | 0.00 | 167.85 |
| | EC_19 | ATUL | 217.69 | 162.08 | 168.40 | 197.30 | 221.43 | 87.81 | 16.87 |
| | EC_20 | EPNL | 129.24 | 109.75 | 119.28 | 170.84 | 135.35 | 0.00 | 22.72 |
| | EC_21 | PRAM | 126.63 | 106.07 | 115.93 | 167.16 | 132.87 | 0.00 | 23.99 |
| | CO_64 | CCRUZ | 331.38 | 268.25 | 271.49 | 233.40 | 333.81 | 205.50 | 13.17 |
| | CO_168 | CCUMB | 213.68 | 153.97 | 160.79 | 178.65 | 217.56 | 99.40 | 9.67 |
| | CO_164 | CGR1C | 351.82 | 286.38 | 287.79 | 40.51 | 353.80 | 286.38 | 1.23 |
| | CO_51 | CMAN1 | 707.83 | 639.98 | 639.29 | 195.85 | 708.94 | 625.47 | 2.19 |

(…/…)

| EQID | ID Est. | Cod. Est. | Repi | Rjb | Rrup | Rx | Rhypo | Ry0 | PGA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EC_20160416235837 | CO_126 | CTUM2 | 206.77 | 141.32 | 145.53 | 44.71 | 210.14 | 141.32 | 9.14 |
| | CO_139 | CYOTO | 555.91 | 488.00 | 488.35 | 170.80 | 557.24 | 475.42 | 0.62 |
| | CO_98 | RAC02 | 491.72 | 423.77 | 424.68 | 183.58 | 493.22 | 405.58 | 5.91 |
| EC_20160518075703 | EC_01 | AAM2 | 218.21 | 204.10 | 205.28 | 204.43 | 219.42 | 85.27 | 4.10 |
| | EC_02 | ACH1 | 407.84 | 387.30 | 387.18 | 182.17 | 408.35 | 351.16 | 1.88 |
| | EC_04 | ACUE | 373.95 | 355.13 | 355.39 | 255.81 | 374.65 | 264.53 | 2.28 |
| | EC_05 | AES2 | 68.75 | 45.22 | 47.93 | -15.15 | 71.70 | 42.61 | 88.03 |
| | EC_06 | AGYE | 271.60 | 250.93 | 251.44 | 113.74 | 272.36 | 232.33 | 1.28 |
| | EC_07 | AIB1 | 173.42 | 159.98 | 161.57 | 167.78 | 174.88 | 58.79 | 24.95 |
| | EC_08 | AIB2 | 175.53 | 162.05 | 163.64 | 169.54 | 176.98 | 59.98 | 16.01 |
| | EC_09 | ALAT | 186.95 | 174.75 | 176.24 | 185.85 | 188.38 | 51.96 | 4.74 |
| | EC_10 | ALIB | 318.35 | 298.04 | 298.30 | 35.89 | 319.00 | 297.56 | 1.36 |
| | EC_11 | ALJ1 | 487.92 | 468.25 | 468.02 | 288.53 | 488.44 | 382.65 | 0.72 |
| | EC_12 | ALOR | 138.25 | 117.48 | 119.35 | 47.50 | 139.74 | 113.97 | 22.01 |
| | EC_22 | AMA1 | 62.56 | 38.57 | 41.82 | -19.98 | 65.85 | 32.99 | 258.76 |
| | EC_13 | AMIL | 284.61 | 264.64 | 265.08 | 161.88 | 285.34 | 222.72 | 2.88 |
| | EC_14 | AMNT | 187.14 | 165.31 | 165.88 | -21.20 | 188.25 | 163.95 | 11.11 |
| | EC_15 | AOTA | 159.53 | 147.46 | 149.28 | 160.51 | 161.16 | 41.45 | 46.04 |
| | EC_16 | APED | 53.60 | 30.39 | 34.31 | -7.32 | 57.33 | 29.49 | 194.74 |
| | EC_17 | APO1 | 179.12 | 159.12 | 159.97 | 10.86 | 180.27 | 159.12 | 12.42 |
| | EC_23 | APR1 | 127.85 | 121.30 | 123.70 | 140.31 | 129.96 | 0.00 | 49.13 |
| | EC_24 | APR2 | 86.23 | 80.12 | 83.23 | 99.13 | 88.78 | 0.00 | 92.31 |
| | EC_25 | APS4 | 194.07 | 188.14 | 189.51 | 207.15 | 195.46 | 0.00 | 4.01 |
| | EC_18 | ASDO | 94.33 | 83.62 | 86.53 | 101.56 | 96.63 | 13.28 | 38.02 |
| | EC_19 | ATUL | 222.54 | 205.76 | 206.99 | 185.03 | 223.77 | 121.51 | 6.88 |
| | EC_26 | AV11 | 154.27 | 146.64 | 148.40 | 165.57 | 155.88 | 4.72 | 10.35 |
| | EC_27 | AV18 | 23.93 | 17.73 | 28.48 | 36.74 | 31.46 | 0.00 | 85.94 |
| | EC_28 | AV21 | 35.40 | 15.38 | 24.38 | 11.80 | 40.84 | 15.38 | 258.37 |
| | EC_20 | EPNL | 147.73 | 141.94 | 143.91 | 160.95 | 149.53 | 0.00 | 10.62 |
| | EC_31 | GYE3 | 282.10 | 261.49 | 261.94 | 124.16 | 282.83 | 239.38 | 5.23 |
| | EC_21 | PRAM | 144.29 | 138.15 | 140.19 | 157.16 | 146.14 | 0.00 | 13.48 |
| | EC_29 | GYE1 | 292.95 | 272.33 | 272.72 | 128.14 | 293.65 | 249.48 | 6.38 |
| | EC_30 | GYE2 | 287.08 | 266.48 | 266.90 | 126.51 | 287.80 | 243.80 | 7.50 |
| EC_20160518164644 | EC_01 | AAM2 | 213.35 | 194.82 | 198.58 | 191.39 | 216.83 | 96.97 | 6.82 |
| | EC_02 | ACH1 | 416.29 | 391.47 | 392.09 | 169.15 | 417.85 | 362.86 | 4.91 |
| | EC_04 | ACUE | 376.56 | 353.44 | 354.76 | 242.78 | 378.53 | 276.22 | 5.63 |
| | EC_05 | AES2 | 64.18 | 36.26 | 47.01 | -28.18 | 73.60 | 22.81 | 43.53 |
| | EC_06 | AGYE | 281.25 | 256.30 | 258.38 | 100.71 | 283.55 | 244.03 | 5.72 |
| | EC_07 | AIB1 | 152.69 | 137.94 | 143.48 | 154.75 | 157.40 | 39.00 | 17.76 |
| | EC_08 | AIB2 | 154.78 | 139.97 | 145.44 | 156.51 | 159.46 | 40.19 | 11.49 |
| | EC_09 | ALAT | 179.94 | 163.30 | 168.00 | 172.81 | 184.08 | 63.66 | 7.98 |
| | EC_10 | ALIB | 333.37 | 309.26 | 310.50 | 22.87 | 335.31 | 309.26 | 5.36 |
| | EC_11 | ALJ1 | 492.68 | 468.76 | 469.05 | 275.51 | 494.16 | 394.34 | 2.26 |
| | EC_12 | ALOR | 119.69 | 94.94 | 102.21 | 34.47 | 125.00 | 94.17 | 14.10 |
| | EC_22 | AMA1 | 61.30 | 35.55 | 46.62 | -33.02 | 71.22 | 13.19 | 112.52 |
| | EC_13 | AMIL | 290.77 | 266.36 | 268.30 | 148.85 | 293.00 | 234.42 | 7.89 |
| | EC_14 | AMNT | 205.83 | 178.95 | 181.03 | -34.23 | 208.96 | 175.65 | 32.61 |
| | EC_15 | AOTA | 139.49 | 126.90 | 133.06 | 147.48 | 144.72 | 21.65 | 20.48 |
| | EC_16 | APED | 74.52 | 45.94 | 54.79 | -20.35 | 82.78 | 41.19 | 526.44 |
| | EC_17 | APO1 | 195.67 | 170.83 | 173.05 | -2.18 | 198.96 | 170.81 | 49.37 |
| | EC_23 | APR1 | 111.59 | 104.83 | 112.52 | 127.27 | 118.21 | 0.00 | 26.36 |
| | EC_24 | APR2 | 70.81 | 63.66 | 74.73 | 86.09 | 79.81 | 0.00 | 70.48 |
| | EC_25 | APS4 | 178.54 | 171.67 | 176.15 | 194.11 | 182.73 | 0.00 | 3.50 |
| | EC_18 | ASDO | 87.80 | 70.65 | 80.62 | 88.53 | 95.14 | 24.98 | 45.09 |
| | EC_19 | ATUL | 200.63 | 180.89 | 185.14 | 172.00 | 204.41 | 101.71 | 8.08 |
| | EC_26 | AV11 | 137.14 | 130.10 | 135.96 | 152.54 | 142.33 | 0.00 | 11.20 |
| | EC_27 | AV18 | 13.57 | 1.26 | 36.63 | 23.70 | 38.59 | 0.00 | 120.95 |
| | EC_28 | AV21 | 25.91 | 1.24 | 30.10 | -1.24 | 44.42 | 0.00 | 232.64 |
| | EC_20 | EPNL | 132.69 | 125.48 | 131.81 | 147.91 | 138.25 | 0.00 | 8.58 |
| | EC_29 | GYE1 | 302.07 | 277.16 | 278.95 | 115.11 | 304.21 | 261.18 | 13.43 |
| | EC_30 | GYE2 | 296.17 | 271.26 | 273.13 | 113.48 | 298.35 | 255.50 | 25.32 |
| | EC_31 | GYE3 | 291.22 | 266.31 | 268.25 | 111.13 | 293.45 | 251.08 | 20.26 |
| | EC_21 | PRAM | 128.52 | 121.68 | 128.24 | 144.12 | 134.26 | 0.00 | 11.22 |

J

# Resultados de la selección de ecuaciones de atenuación según ambiente tectónico

En este anexo se presentan resultados de los parámetros de evaluación de las ecuaciones de atenuación. Se presentan los resultados del parámetro LLH, ya que se considera como criterio principal para la selección.

Como complemento, se presentan los resultados de los otros parámetros considerados (LH, LLH. EDR, $k^2$ y residuales) para las ecuaciones de mejor ajuste (según el parámetro LLH) y para diferentes periodos estructurales. Los resultados se organizan según ambientes tectónicos (cortical, nido sísmico de Bucaramanga, Benioff e interplaca).

### Valores de LLH para sismos según ambientes tectónicos

**Tabla J. 1** Estadísticos LLH para las ecuaciones pre seleccionadas para fuentes corticales

| Ecuación | LLH | Peso |
|---|---|---|
| CauzziEtAl2014FixedVs30NoSOF | 2.72507 | 0.05079 |
| CauzziEtAl2014NoSOF | 2.7272 | 0.05072 |
| CauzziEtAl2014 | 2.73196 | 0.05055 |
| CauzziEtAl2014FixedVs30 | 2.7347 | 0.05045 |
| CauzziEtAl2014Eurocode8NoSOF | 2.8483 | 0.04663 |
| Idriss2014 | 2.8553 | 0.04641 |
| CauzziEtAl2014Eurocode8 | 2.85633 | 0.04637 |
| FaccioliEtAl2010 | 2.99103 | 0.04224 |
| AbrahamsonEtAl2014RegCHN | 3.21195 | 0.03624 |
| AbrahamsonEtAl2014 | 3.22303 | 0.03597 |
| BooreEtAl2014NoSOF | 3.42886 | 0.03118 |
| BooreEtAl2014 | 3.45759 | 0.03057 |
| AbrahamsonEtAl2014RegTWN | 3.48147 | 0.03007 |
| BooreEtAl2014LowQNoSOF | 3.6502 | 0.02675 |
| BooreEtAl2014LowQ | 3.65895 | 0.02659 |
| BooreEtAl2014LowQCaliforniaBasinNoSOF | 3.84892 | 0.02331 |
| BooreEtAl2014LowQCaliforniaBasin | 3.86963 | 0.02297 |
| BooreEtAl2014LowQJapanBasinNoSOF | 3.8748 | 0.02289 |
| BooreEtAl2014LowQJapanBasin | 3.89656 | 0.02255 |
| CampbellBozorgnia2014 | 3.89967 | 0.0225 |
| BooreEtAl2014CaliforniaBasinNoSOF | 3.91125 | 0.02232 |
| BooreEtAl2014CaliforniaBasin | 3.95193 | 0.0217 |
| BooreEtAl2014JapanBasinNoSOF | 3.96265 | 0.02154 |
| AbrahamsonEtAl2014RegJPN | 3.98616 | 0.02119 |
| BooreEtAl2014JapanBasin | 4.00439 | 0.02093 |
| CauzziFaccioli2008 | 4.09188 | 0.01969 |
| CampbellBozorgnia2014LowQ | 4.15866 | 0.0188 |
| CampbellBozorgnia2014JapanSite | 4.21683 | 0.01806 |
| CampbellBozorgnia2014HighQ | 4.24754 | 0.01768 |
| CampbellBozorgnia2014LowQJapanSite | 4.39419 | 0.01597 |
| CampbellBozorgnia2014HighQJapanSite | 4.58487 | 0.01399 |

(.../...)

| | | |
|---|---|---|
| ChiouYoungs2014 | 4.60237 | 0.01382 |
| AbrahamsonSilva2008 | 5.08086 | 0.00992 |
| CauzziFaccioli2008SWISS04 | 5.1603 | 0.00939 |
| CauzziFaccioli2008SWISS08 | 5.17485 | 0.0093 |
| CauzziFaccioli2008SWISS01 | 5.18268 | 0.00925 |
| BooreAtkinson2008 | 5.53157 | 0.00726 |
| BooreEtAl2014HighQNoSOF | 6.50319 | 0.0037 |
| BooreEtAl2014HighQ | 6.5692 | 0.00354 |
| BooreEtAl2014HighQCaliforniaBasinNoSOF | 7.66651 | 0.00165 |
| BooreEtAl2014HighQCaliforniaBasin | 7.74449 | 0.00157 |
| BooreEtAl2014HighQJapanBasinNoSOF | 7.77934 | 0.00153 |
| BooreEtAl2014HighQJapanBasin | 7.85836 | 0.00145 |

**Tabla J. 2** Estadísticos LLH para las ecuaciones pre seleccionadas para el Nido de Bucaramanga

| Ecuación | LLH | Peso |
|---|---|---|
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 | 2.81896 | 0.18417 |
| ZhaoEtAl2006SSlab | 2.81896 | 0.18417 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab | 3.45532 | 0.11848 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh | 3.45532 | 0.11848 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlabLow | 3.45532 | 0.11848 |
| MontalvaEtAl2016SSlab | 3.52116 | 0.1132 |
| GarciaEtAl2005SSlab | 4.01237 | 0.08053 |
| LinLee2008SSlab | 4.91282 | 0.04314 |
| GarciaEtAl2005SSlabVert | 5.04588 | 0.03934 |

**Tabla J. 3** Estadísticos LLH para las ecuaciones pre seleccionadas en la zona de Benioff

| Ecuación | LLH | Peso |
|---|---|---|
| MontalvaEtAl2016SSlab | 2.93688 | 0.18585 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlab | 3.22638 | 0.15206 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlabHigh | 3.22638 | 0.15206 |
| AbrahamsonEtAl2015SSlabLow | 3.22638 | 0.15206 |
| ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014 | 4.02378 | 0.08749 |
| ZhaoEtAl2006SSlab | 4.02378 | 0.08749 |
| GarciaEtAl2005SSlab | 4.07034 | 0.08472 |
| GarciaEtAl2005SSlabVert | 4.18825 | 0.07807 |
| LinLee2008SSlab | 6.13953 | 0.02019 |

**Tabla J. 4** Estadísticos LLH para las ecuaciones pre seleccionadas para las fuentes interplaca del Pacífico

| Ecuación | LLH | Peso |
|---|---|---|
| AbrahamsonEtAl2015SInterLow | 3.21348 | 0.15411 |
| AbrahamsonEtAl2015SInter | 3.22748 | 0.15262 |
| AbrahamsonEtAl2015SInterHigh | 3.24524 | 0.15075 |
| ZhaoEtAl2006SInterNSHMP2008 | 3.55634 | 0.12151 |
| ZhaoEtAl2006SInter | 3.78831 | 0.10346 |
| GarciaEtAl2005SSlab | 3.86305 | 0.09824 |
| GarciaEtAl2005SSlabVert | 3.99714 | 0.08952 |
| MontalvaEtAl2016SInter | 4.24731 | 0.07527 |
| LinLee2008SInter | 5.07921 | 0.04229 |
| GhofraniAtkinson2014Lower | 7.77666 | 0.00652 |
| GhofraniAtkinson2014CascadiaLower | 8.22623 | 0.00477 |
| GhofraniAtkinson2014 | 11.31666 | 0.00056 |
| GhofraniAtkinson2014Cascadia | 12.01373 | 0.00035 |
| GhofraniAtkinson2014Upper | 16.36289 | 0.00002 |
| GhofraniAtkinson2014CascadiaUpper | 17.30746 | 0.00001 |

### Resultados de los parámetros de evaluación para diferentes periodos de vibración

A continuación se presentan los resultados de los diferentes parámetros de evaluación (LH, LLH. EDR, $k^2$ y residuales) por región tectónica para las ecuaciones con mejor ajuste.

### Eventos corticales

**Tabla J. 5** Resultados del estadístico LH para los eventos corticales

| Te, [s] | Mediana LLH | | | Peso LLH | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Idriss2014 | CauzziEtAl2014 | AbrahamsonEtAl2014 | Idriss2014 | CauzziEtAl2014 | AbrahamsonEtAl2014 |
| 0 | 3.28 | 3.61 | 4.42 | 0.44 | 0.35 | 0.20 |
| 0.1 | 3.42 | 3.44 | 6.16 | 0.47 | 0.46 | 0.07 |
| 0.2 | 3.42 | 4.11 | 4.95 | 0.51 | 0.31 | 0.18 |
| 0.3 | 3.25 | 4.09 | 3.82 | 0.45 | 0.25 | 0.30 |
| 0.4 | 3.12 | 3.83 | 3.86 | 0.45 | 0.28 | 0.27 |
| 0.5 | 3.16 | 3.74 | 4.32 | 0.47 | 0.32 | 0.21 |
| 0.6 | 3.02 | 3.42 | 4.00 | 0.44 | 0.33 | 0.22 |
| 0.7 | 2.93 | 3.21 | 3.79 | 0.42 | 0.35 | 0.23 |
| 0.8 | 2.87 | 3.06 | 3.57 | 0.40 | 0.35 | 0.25 |
| 0.9 | 2.90 | 2.94 | 3.41 | 0.37 | 0.36 | 0.26 |
| 1 | 2.97 | 2.91 | 3.34 | 0.36 | 0.37 | 0.27 |
| 1.1 | 2.92 | 2.79 | 3.27 | 0.35 | 0.38 | 0.27 |
| 1.2 | 2.91 | 2.72 | 3.25 | 0.34 | 0.39 | 0.27 |
| 1.3 | 2.90 | 2.64 | 3.21 | 0.33 | 0.40 | 0.27 |
| 1.4 | 2.81 | 2.55 | 3.17 | 0.34 | 0.40 | 0.26 |
| 1.5 | 2.75 | 2.48 | 3.16 | 0.34 | 0.41 | 0.26 |
| 1.6 | 2.69 | 2.43 | 3.15 | 0.34 | 0.41 | 0.25 |
| 1.7 | 2.64 | 2.40 | 3.16 | 0.35 | 0.41 | 0.24 |
| 1.8 | 2.61 | 2.38 | 3.17 | 0.35 | 0.41 | 0.24 |
| 1.9 | 2.58 | 2.37 | 3.20 | 0.36 | 0.41 | 0.23 |
| 2 | 2.57 | 2.35 | 3.24 | 0.36 | 0.42 | 0.23 |
| 2.1 | 2.54 | 2.35 | 3.27 | 0.36 | 0.42 | 0.22 |
| 2.2 | 2.53 | 2.35 | 3.30 | 0.37 | 0.42 | 0.22 |
| 2.3 | 2.52 | 2.38 | 3.35 | 0.38 | 0.41 | 0.21 |
| 2.4 | 2.52 | 2.42 | 3.40 | 0.38 | 0.41 | 0.21 |
| 2.5 | 2.52 | 2.46 | 3.46 | 0.39 | 0.41 | 0.20 |
| 2.6 | 2.51 | 2.50 | 3.50 | 0.40 | 0.40 | 0.20 |
| 2.7 | 2.50 | 2.53 | 3.55 | 0.41 | 0.40 | 0.20 |
| 2.8 | 2.49 | 2.56 | 3.60 | 0.41 | 0.39 | 0.19 |
| 2.9 | 2.49 | 2.60 | 3.66 | 0.42 | 0.39 | 0.19 |
| 3 | 2.49 | 2.65 | 3.72 | 0.43 | 0.38 | 0.18 |
| 3.1 | 2.51 | 2.67 | 3.75 | 0.43 | 0.39 | 0.18 |
| 3.2 | 2.55 | 2.69 | 3.79 | 0.43 | 0.39 | 0.18 |
| 3.3 | 2.59 | 2.72 | 3.83 | 0.43 | 0.39 | 0.18 |
| 3.4 | 2.63 | 2.76 | 3.87 | 0.43 | 0.39 | 0.18 |
| 3.5 | 2.68 | 2.80 | 3.91 | 0.43 | 0.39 | 0.18 |
| 3.6 | 2.73 | 2.84 | 3.95 | 0.42 | 0.39 | 0.18 |
| 3.7 | 2.78 | 2.87 | 3.99 | 0.42 | 0.40 | 0.18 |
| 3.8 | 2.84 | 2.90 | 4.03 | 0.42 | 0.40 | 0.18 |
| 3.9 | 2.90 | 2.94 | 4.08 | 0.41 | 0.40 | 0.18 |
| 4 | 2.97 | 2.97 | 4.13 | 0.41 | 0.41 | 0.18 |
| 4.1 | 3.00 | 2.98 | 4.11 | 0.40 | 0.41 | 0.19 |
| 4.2 | 3.03 | 3.00 | 4.10 | 0.40 | 0.41 | 0.19 |
| 4.3 | 3.07 | 3.03 | 4.09 | 0.40 | 0.41 | 0.19 |
| 4.4 | 3.10 | 3.05 | 4.09 | 0.39 | 0.41 | 0.20 |
| 4.5 | 3.14 | 3.09 | 4.08 | 0.39 | 0.41 | 0.20 |
| 4.6 | 3.18 | 3.11 | 4.07 | 0.39 | 0.41 | 0.21 |
| 4.7 | 3.21 | 3.13 | 4.07 | 0.38 | 0.41 | 0.21 |
| 4.8 | 3.25 | 3.17 | 4.07 | 0.38 | 0.40 | 0.22 |
| 4.9 | 3.29 | 3.21 | 4.06 | 0.38 | 0.40 | 0.22 |
| 5 | 3.33 | 3.24 | 4.06 | 0.38 | 0.40 | 0.23 |

**Tabla J. 6** Resultados del estadístico EDR para eventos corticales

| Te, [s] | EDR | | | k^2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Idriss2014 | CauzziEtAl2014 | AbrahamsonEtAl2014 | Idriss2014 | CauzziEtAl2014 | AbrahamsonEtAl2014 |
| 0 | 1.47 | 2.47 | 1.55 | 1.14 | 1.70 | 1.00 |
| 0.1 | 1.46 | 2.52 | 2.13 | 1.06 | 1.64 | 1.07 |
| 0.2 | 1.74 | 3.42 | 1.79 | 1.22 | 2.02 | 1.02 |
| 0.3 | 1.68 | 3.24 | 1.49 | 1.20 | 1.96 | 1.01 |
| 0.4 | 1.62 | 2.98 | 1.81 | 1.18 | 1.84 | 1.22 |
| 0.5 | 1.74 | 2.87 | 2.29 | 1.24 | 1.77 | 1.44 |
| 0.6 | 1.59 | 2.58 | 2.12 | 1.17 | 1.66 | 1.40 |
| 0.7 | 1.51 | 2.31 | 2.03 | 1.12 | 1.55 | 1.39 |
| 0.8 | 1.46 | 2.12 | 1.90 | 1.10 | 1.49 | 1.35 |
| 0.9 | 1.46 | 2.02 | 1.78 | 1.09 | 1.45 | 1.30 |
| 1 | 1.49 | 1.98 | 1.72 | 1.09 | 1.44 | 1.27 |
| 1.1 | 1.47 | 1.90 | 1.69 | 1.08 | 1.41 | 1.27 |
| 1.2 | 1.47 | 1.83 | 1.69 | 1.08 | 1.39 | 1.28 |
| 1.3 | 1.47 | 1.76 | 1.68 | 1.08 | 1.37 | 1.29 |
| 1.4 | 1.43 | 1.67 | 1.69 | 1.07 | 1.34 | 1.30 |
| 1.5 | 1.40 | 1.60 | 1.71 | 1.06 | 1.31 | 1.32 |
| 1.6 | 1.37 | 1.55 | 1.74 | 1.06 | 1.29 | 1.35 |
| 1.7 | 1.35 | 1.50 | 1.78 | 1.05 | 1.28 | 1.38 |
| 1.8 | 1.34 | 1.47 | 1.82 | 1.05 | 1.27 | 1.40 |
| 1.9 | 1.33 | 1.45 | 1.87 | 1.05 | 1.26 | 1.43 |
| 2 | 1.32 | 1.43 | 1.92 | 1.05 | 1.25 | 1.46 |
| 2.1 | 1.31 | 1.43 | 1.96 | 1.04 | 1.25 | 1.48 |
| 2.2 | 1.31 | 1.44 | 2.00 | 1.04 | 1.25 | 1.50 |
| 2.3 | 1.30 | 1.46 | 2.04 | 1.04 | 1.27 | 1.52 |
| 2.4 | 1.31 | 1.50 | 2.08 | 1.04 | 1.28 | 1.53 |
| 2.5 | 1.31 | 1.53 | 2.12 | 1.04 | 1.30 | 1.55 |
| 2.6 | 1.30 | 1.56 | 2.17 | 1.04 | 1.31 | 1.56 |
| 2.7 | 1.30 | 1.58 | 2.21 | 1.04 | 1.32 | 1.58 |
| 2.8 | 1.30 | 1.62 | 2.25 | 1.04 | 1.34 | 1.60 |
| 2.9 | 1.30 | 1.66 | 2.29 | 1.04 | 1.36 | 1.61 |
| 3 | 1.30 | 1.72 | 2.33 | 1.04 | 1.38 | 1.62 |
| 3.1 | 1.30 | 1.75 | 2.36 | 1.03 | 1.39 | 1.63 |
| 3.2 | 1.30 | 1.77 | 2.38 | 1.02 | 1.40 | 1.64 |
| 3.3 | 1.31 | 1.79 | 2.41 | 1.01 | 1.40 | 1.65 |
| 3.4 | 1.32 | 1.82 | 2.43 | 1.01 | 1.41 | 1.65 |
| 3.5 | 1.34 | 1.85 | 2.46 | 1.01 | 1.43 | 1.66 |
| 3.6 | 1.36 | 1.89 | 2.48 | 1.01 | 1.44 | 1.67 |
| 3.7 | 1.38 | 1.91 | 2.50 | 1.01 | 1.45 | 1.67 |
| 3.8 | 1.41 | 1.93 | 2.52 | 1.01 | 1.45 | 1.68 |
| 3.9 | 1.43 | 1.95 | 2.55 | 1.01 | 1.45 | 1.68 |
| 4 | 1.46 | 1.97 | 2.57 | 1.02 | 1.46 | 1.68 |
| 4.1 | 1.48 | 1.97 | 2.55 | 1.02 | 1.46 | 1.67 |
| 4.2 | 1.49 | 1.99 | 2.53 | 1.02 | 1.47 | 1.66 |
| 4.3 | 1.51 | 2.01 | 2.51 | 1.02 | 1.47 | 1.65 |
| 4.4 | 1.53 | 2.03 | 2.49 | 1.02 | 1.48 | 1.65 |
| 4.5 | 1.54 | 2.06 | 2.47 | 1.03 | 1.49 | 1.64 |
| 4.6 | 1.56 | 2.08 | 2.46 | 1.03 | 1.50 | 1.63 |
| 4.7 | 1.58 | 2.10 | 2.44 | 1.03 | 1.51 | 1.62 |
| 4.8 | 1.60 | 2.13 | 2.42 | 1.04 | 1.52 | 1.61 |
| 4.9 | 1.62 | 2.16 | 2.41 | 1.04 | 1.53 | 1.60 |
| 5 | 1.63 | 2.19 | 2.40 | 1.04 | 1.54 | 1.59 |

Tabla J. 7 Valores de la media y la mediana de los residuales normalizados para eventos corticales

| Te, [s] | Residuales | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Media | | | Mediana | | |
| | Idriss2014 | CauzziEtAl2014 | AbrahamsonEtAl2014 | Idriss2014 | CauzziEtAl2014 | AbrahamsonEtAl2014 |
| 0 | -0.18 | -0.77 | 0.11 | -0.16 | -0.63 | -0.12 |
| 0.1 | -0.01 | -0.78 | 0.73 | -0.03 | -0.72 | 0.41 |
| 0.2 | -0.49 | -1.00 | 0.28 | -0.43 | -0.87 | 0.03 |
| 0.3 | -0.36 | -0.88 | -0.28 | -0.34 | -0.75 | -0.38 |
| 0.4 | -0.24 | -0.70 | -0.88 | -0.26 | -0.60 | -0.90 |
| 0.5 | -0.29 | -0.65 | -1.17 | -0.32 | -0.49 | -1.20 |
| 0.6 | -0.12 | -0.52 | -1.02 | -0.17 | -0.39 | -1.13 |
| 0.7 | -0.02 | -0.43 | -0.95 | -0.12 | -0.35 | -1.00 |
| 0.8 | 0.06 | -0.35 | -0.86 | 0.03 | -0.29 | -0.85 |
| 0.9 | 0.14 | -0.27 | -0.75 | 0.12 | -0.20 | -0.74 |
| 1 | 0.20 | -0.24 | -0.67 | 0.14 | -0.18 | -0.66 |
| 1.1 | 0.23 | -0.22 | -0.67 | 0.18 | -0.14 | -0.71 |
| 1.2 | 0.25 | -0.18 | -0.68 | 0.17 | -0.16 | -0.70 |
| 1.3 | 0.27 | -0.14 | -0.69 | 0.23 | -0.13 | -0.73 |
| 1.4 | 0.25 | -0.13 | -0.73 | 0.20 | -0.10 | -0.78 |
| 1.5 | 0.23 | -0.12 | -0.78 | 0.14 | -0.10 | -0.80 |
| 1.6 | 0.20 | -0.12 | -0.82 | 0.12 | -0.08 | -0.85 |
| 1.7 | 0.18 | -0.12 | -0.86 | 0.05 | -0.08 | -0.90 |
| 1.8 | 0.15 | -0.11 | -0.90 | 0.04 | -0.09 | -0.93 |
| 1.9 | 0.13 | -0.12 | -0.94 | 0.04 | -0.09 | -0.97 |
| 2 | 0.10 | -0.13 | -0.97 | -0.01 | -0.11 | -1.02 |
| 2.1 | 0.09 | -0.15 | -1.00 | -0.02 | -0.13 | -1.04 |
| 2.2 | 0.07 | -0.18 | -1.02 | -0.05 | -0.20 | -1.06 |
| 2.3 | 0.06 | -0.23 | -1.05 | -0.05 | -0.25 | -1.09 |
| 2.4 | 0.04 | -0.28 | -1.07 | -0.05 | -0.29 | -1.12 |
| 2.5 | 0.03 | -0.32 | -1.09 | -0.05 | -0.34 | -1.13 |
| 2.6 | 0.01 | -0.37 | -1.12 | -0.08 | -0.35 | -1.09 |
| 2.7 | -0.01 | -0.41 | -1.14 | -0.08 | -0.38 | -1.12 |
| 2.8 | -0.02 | -0.45 | -1.17 | -0.09 | -0.42 | -1.12 |
| 2.9 | -0.04 | -0.49 | -1.19 | -0.11 | -0.43 | -1.13 |
| 3 | -0.06 | -0.54 | -1.21 | -0.12 | -0.46 | -1.15 |
| 3.1 | -0.02 | -0.58 | -1.23 | -0.11 | -0.48 | -1.16 |
| 3.2 | 0.01 | -0.60 | -1.24 | -0.09 | -0.50 | -1.16 |
| 3.3 | 0.05 | -0.63 | -1.26 | -0.06 | -0.54 | -1.17 |
| 3.4 | 0.08 | -0.66 | -1.27 | -0.01 | -0.57 | -1.19 |
| 3.5 | 0.11 | -0.69 | -1.29 | 0.03 | -0.59 | -1.18 |
| 3.6 | 0.14 | -0.72 | -1.30 | 0.06 | -0.62 | -1.18 |
| 3.7 | 0.17 | -0.75 | -1.31 | 0.09 | -0.64 | -1.18 |
| 3.8 | 0.20 | -0.76 | -1.33 | 0.11 | -0.66 | -1.19 |
| 3.9 | 0.22 | -0.78 | -1.34 | 0.13 | -0.68 | -1.20 |
| 4 | 0.25 | -0.80 | -1.35 | 0.14 | -0.69 | -1.22 |
| 4.1 | 0.27 | -0.81 | -1.34 | 0.14 | -0.70 | -1.22 |
| 4.2 | 0.29 | -0.83 | -1.34 | 0.16 | -0.72 | -1.21 |
| 4.3 | 0.30 | -0.84 | -1.33 | 0.18 | -0.71 | -1.18 |
| 4.4 | 0.32 | -0.86 | -1.32 | 0.21 | -0.74 | -1.19 |
| 4.5 | 0.34 | -0.88 | -1.32 | 0.22 | -0.76 | -1.20 |
| 4.6 | 0.35 | -0.90 | -1.31 | 0.22 | -0.77 | -1.19 |
| 4.7 | 0.37 | -0.91 | -1.30 | 0.23 | -0.79 | -1.19 |
| 4.8 | 0.38 | -0.93 | -1.30 | 0.24 | -0.82 | -1.18 |
| 4.9 | 0.40 | -0.95 | -1.29 | 0.26 | -0.83 | -1.18 |
| 5 | 0.41 | -0.97 | -1.29 | 0.27 | -0.85 | -1.17 |

Tabla J. 8 Estimador LH y desviación de los residuales normalizados para eventos corticales

| Te, [s] | Std. Residuales | | | LH | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Idriss2014 | CauzziEtAl2014 | AbrahamsonEtAl2014 | Idriss2014 | CauzziEtAl2014 | AbrahamsonEtAl2014 |
| 0 | 1.64 | 1.61 | 2.07 | 0.31 | 0.25 | 0.22 |
| 0.1 | 1.70 | 1.52 | 2.48 | 0.26 | 0.26 | 0.13 |
| 0.2 | 1.64 | 1.70 | 2.22 | 0.29 | 0.20 | 0.19 |
| 0.3 | 1.59 | 1.75 | 1.84 | 0.32 | 0.22 | 0.22 |
| 0.4 | 1.56 | 1.73 | 1.66 | 0.34 | 0.26 | 0.21 |
| 0.5 | 1.57 | 1.71 | 1.67 | 0.33 | 0.32 | 0.15 |
| 0.6 | 1.53 | 1.62 | 1.63 | 0.37 | 0.31 | 0.18 |
| 0.7 | 1.49 | 1.56 | 1.59 | 0.37 | 0.33 | 0.23 |
| 0.8 | 1.46 | 1.51 | 1.54 | 0.39 | 0.35 | 0.27 |
| 0.9 | 1.47 | 1.47 | 1.53 | 0.38 | 0.38 | 0.28 |
| 1 | 1.50 | 1.46 | 1.53 | 0.37 | 0.36 | 0.28 |
| 1.1 | 1.47 | 1.41 | 1.50 | 0.40 | 0.37 | 0.29 |
| 1.2 | 1.46 | 1.38 | 1.49 | 0.38 | 0.36 | 0.29 |
| 1.3 | 1.45 | 1.35 | 1.46 | 0.41 | 0.39 | 0.29 |
| 1.4 | 1.41 | 1.30 | 1.42 | 0.41 | 0.40 | 0.31 |
| 1.5 | 1.39 | 1.26 | 1.39 | 0.41 | 0.41 | 0.31 |
| 1.6 | 1.36 | 1.23 | 1.36 | 0.43 | 0.43 | 0.30 |
| 1.7 | 1.34 | 1.22 | 1.34 | 0.45 | 0.43 | 0.29 |
| 1.8 | 1.33 | 1.20 | 1.32 | 0.46 | 0.45 | 0.29 |
| 1.9 | 1.32 | 1.20 | 1.31 | 0.46 | 0.46 | 0.27 |
| 2 | 1.31 | 1.19 | 1.31 | 0.46 | 0.45 | 0.26 |
| 2.1 | 1.30 | 1.18 | 1.30 | 0.47 | 0.46 | 0.25 |
| 2.2 | 1.29 | 1.18 | 1.30 | 0.47 | 0.46 | 0.24 |
| 2.3 | 1.29 | 1.19 | 1.31 | 0.47 | 0.45 | 0.23 |
| 2.4 | 1.29 | 1.20 | 1.32 | 0.48 | 0.45 | 0.22 |
| 2.5 | 1.29 | 1.21 | 1.33 | 0.48 | 0.44 | 0.22 |
| 2.6 | 1.28 | 1.22 | 1.33 | 0.47 | 0.43 | 0.22 |
| 2.7 | 1.27 | 1.23 | 1.34 | 0.47 | 0.43 | 0.22 |
| 2.8 | 1.27 | 1.23 | 1.34 | 0.47 | 0.41 | 0.21 |
| 2.9 | 1.27 | 1.24 | 1.35 | 0.47 | 0.40 | 0.21 |
| 3 | 1.27 | 1.24 | 1.36 | 0.45 | 0.38 | 0.21 |
| 3.1 | 1.28 | 1.24 | 1.36 | 0.46 | 0.38 | 0.21 |
| 3.2 | 1.30 | 1.24 | 1.37 | 0.43 | 0.38 | 0.20 |
| 3.3 | 1.32 | 1.24 | 1.37 | 0.44 | 0.38 | 0.20 |
| 3.4 | 1.34 | 1.25 | 1.38 | 0.44 | 0.36 | 0.20 |
| 3.5 | 1.37 | 1.25 | 1.39 | 0.44 | 0.37 | 0.19 |
| 3.6 | 1.39 | 1.26 | 1.40 | 0.43 | 0.37 | 0.19 |
| 3.7 | 1.41 | 1.26 | 1.41 | 0.43 | 0.36 | 0.19 |
| 3.8 | 1.44 | 1.27 | 1.41 | 0.41 | 0.36 | 0.19 |
| 3.9 | 1.46 | 1.27 | 1.43 | 0.41 | 0.35 | 0.19 |
| 4 | 1.49 | 1.28 | 1.44 | 0.40 | 0.35 | 0.19 |
| 4.1 | 1.50 | 1.28 | 1.44 | 0.40 | 0.35 | 0.19 |
| 4.2 | 1.51 | 1.28 | 1.44 | 0.39 | 0.35 | 0.20 |
| 4.3 | 1.53 | 1.29 | 1.44 | 0.39 | 0.35 | 0.20 |
| 4.4 | 1.54 | 1.29 | 1.44 | 0.39 | 0.35 | 0.20 |
| 4.5 | 1.55 | 1.29 | 1.44 | 0.39 | 0.34 | 0.20 |
| 4.6 | 1.56 | 1.29 | 1.45 | 0.39 | 0.33 | 0.21 |
| 4.7 | 1.58 | 1.30 | 1.45 | 0.37 | 0.34 | 0.21 |
| 4.8 | 1.59 | 1.30 | 1.46 | 0.37 | 0.33 | 0.21 |
| 4.9 | 1.60 | 1.30 | 1.46 | 0.37 | 0.32 | 0.20 |
| 5 | 1.62 | 1.31 | 1.46 | 0.36 | 0.32 | 0.20 |

## Resultados para sismos interplaca (subducción)

**Tabla J. 9** Mediana del LLH y peso calculado con LLH para los eventos de interplaca

| Te, [s] | Mediana LLH | | | Peso LLH | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Abrahamson | Zhao | Montalva | Abrahamson | Zhao | Montalva |
| 0 | 3.37 | 3.99 | 3.66 | 0.41 | 0.26 | 0.33 |
| 0.1 | 3.84 | 3.49 | 3.69 | 0.30 | 0.38 | 0.33 |
| 0.2 | 3.55 | 3.98 | 3.91 | 0.40 | 0.29 | 0.31 |
| 0.3 | 3.16 | 4.30 | 4.04 | 0.50 | 0.23 | 0.27 |
| 0.4 | 3.15 | 4.25 | 4.18 | 0.51 | 0.24 | 0.25 |
| 0.5 | 3.18 | 4.24 | 4.41 | 0.53 | 0.25 | 0.22 |
| 0.6 | 3.12 | 3.94 | 4.36 | 0.50 | 0.28 | 0.21 |
| 0.7 | 3.20 | 3.64 | 4.15 | 0.44 | 0.33 | 0.23 |
| 0.8 | 3.38 | 3.45 | 3.99 | 0.38 | 0.37 | 0.25 |
| 0.9 | 3.33 | 3.20 | 3.77 | 0.35 | 0.39 | 0.26 |
| 1 | 3.29 | 3.04 | 3.70 | 0.34 | 0.40 | 0.26 |
| 1.1 | 3.22 | 2.90 | 3.57 | 0.33 | 0.41 | 0.26 |
| 1.2 | 3.20 | 2.81 | 3.49 | 0.32 | 0.42 | 0.26 |
| 1.3 | 3.20 | 2.74 | 3.50 | 0.31 | 0.43 | 0.26 |
| 1.4 | 3.19 | 2.71 | 3.58 | 0.32 | 0.44 | 0.24 |
| 1.5 | 3.22 | 2.71 | 3.69 | 0.32 | 0.45 | 0.23 |
| 1.6 | 3.16 | 2.71 | 3.68 | 0.33 | 0.45 | 0.23 |
| 1.7 | 3.12 | 2.72 | 3.69 | 0.33 | 0.44 | 0.23 |
| 1.8 | 3.09 | 2.74 | 3.70 | 0.34 | 0.44 | 0.22 |
| 1.9 | 3.08 | 2.77 | 3.73 | 0.35 | 0.43 | 0.22 |
| 2 | 3.08 | 2.81 | 3.77 | 0.35 | 0.43 | 0.22 |
| 2.1 | 3.05 | 2.86 | 3.71 | 0.36 | 0.41 | 0.23 |
| 2.2 | 3.03 | 2.92 | 3.66 | 0.37 | 0.40 | 0.24 |
| 2.3 | 3.02 | 2.99 | 3.63 | 0.37 | 0.38 | 0.25 |
| 2.4 | 3.03 | 3.06 | 3.61 | 0.38 | 0.37 | 0.25 |
| 2.5 | 3.04 | 3.15 | 3.60 | 0.38 | 0.36 | 0.26 |
| 2.6 | 3.05 | 3.25 | 3.70 | 0.40 | 0.35 | 0.26 |
| 2.7 | 3.07 | 3.37 | 3.80 | 0.41 | 0.34 | 0.25 |
| 2.8 | 3.09 | 3.48 | 3.91 | 0.43 | 0.33 | 0.24 |
| 2.9 | 3.12 | 3.61 | 4.02 | 0.44 | 0.32 | 0.24 |
| 3 | 3.15 | 3.73 | 4.15 | 0.46 | 0.31 | 0.23 |
| 3.1 | 3.16 | 3.76 | 4.21 | 0.47 | 0.31 | 0.23 |
| 3.2 | 3.16 | 3.78 | 4.27 | 0.47 | 0.31 | 0.22 |
| 3.3 | 3.17 | 3.81 | 4.34 | 0.48 | 0.31 | 0.21 |
| 3.4 | 3.19 | 3.84 | 4.40 | 0.48 | 0.31 | 0.21 |
| 3.5 | 3.20 | 3.87 | 4.47 | 0.49 | 0.31 | 0.20 |
| 3.6 | 3.22 | 3.90 | 4.54 | 0.49 | 0.31 | 0.20 |
| 3.7 | 3.24 | 3.94 | 4.60 | 0.50 | 0.31 | 0.19 |
| 3.8 | 3.26 | 3.97 | 4.67 | 0.50 | 0.31 | 0.19 |
| 3.9 | 3.29 | 4.00 | 4.74 | 0.51 | 0.31 | 0.18 |
| 4 | 3.31 | 4.04 | 4.81 | 0.51 | 0.31 | 0.18 |
| 4.1 | 3.32 | 4.05 | 4.91 | 0.52 | 0.31 | 0.17 |
| 4.2 | 3.32 | 4.05 | 5.00 | 0.52 | 0.31 | 0.16 |
| 4.3 | 3.33 | 4.06 | 5.10 | 0.53 | 0.32 | 0.15 |
| 4.4 | 3.34 | 4.07 | 5.20 | 0.53 | 0.32 | 0.15 |
| 4.5 | 3.35 | 4.08 | 5.29 | 0.54 | 0.32 | 0.14 |
| 4.6 | 3.36 | 4.09 | 5.40 | 0.54 | 0.33 | 0.13 |
| 4.7 | 3.37 | 4.10 | 5.50 | 0.55 | 0.33 | 0.13 |
| 4.8 | 3.39 | 4.11 | 5.60 | 0.55 | 0.33 | 0.12 |
| 4.9 | 3.40 | 4.13 | 5.70 | 0.55 | 0.33 | 0.11 |
| 5 | 3.41 | 4.14 | 5.81 | 0.56 | 0.34 | 0.11 |

**Tabla J. 10** Estimadores para la distancia euclidiana para los eventos de interplaca

| Te, [s] | EDR | | | k^2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Abrahamson | Zhao | Montalva | Abrahamson | Zhao | Montalva |
| 0 | 1.64 | 2.05 | 2.12 | 1.25 | 1.42 | 1.40 |
| 0.1 | 1.77 | 1.89 | 2.21 | 1.23 | 1.23 | 1.33 |
| 0.2 | 1.70 | 2.53 | 2.32 | 1.24 | 1.57 | 1.36 |
| 0.3 | 1.41 | 2.86 | 2.46 | 1.12 | 1.77 | 1.45 |
| 0.4 | 1.36 | 2.88 | 2.78 | 1.08 | 1.80 | 1.62 |
| 0.5 | 1.31 | 2.92 | 2.93 | 1.04 | 1.84 | 1.75 |
| 0.6 | 1.27 | 2.77 | 3.11 | 1.02 | 1.82 | 1.90 |
| 0.7 | 1.30 | 2.49 | 2.90 | 1.02 | 1.72 | 1.85 |
| 0.8 | 1.36 | 2.24 | 2.71 | 1.03 | 1.61 | 1.79 |
| 0.9 | 1.35 | 2.05 | 2.59 | 1.04 | 1.55 | 1.78 |
| 1 | 1.34 | 1.94 | 2.57 | 1.04 | 1.52 | 1.80 |
| 1.1 | 1.33 | 1.85 | 2.56 | 1.04 | 1.50 | 1.84 |
| 1.2 | 1.33 | 1.78 | 2.56 | 1.05 | 1.49 | 1.86 |
| 1.3 | 1.33 | 1.72 | 2.59 | 1.05 | 1.46 | 1.88 |
| 1.4 | 1.33 | 1.69 | 2.68 | 1.05 | 1.44 | 1.92 |
| 1.5 | 1.33 | 1.66 | 2.77 | 1.05 | 1.42 | 1.94 |
| 1.6 | 1.31 | 1.69 | 2.75 | 1.04 | 1.44 | 1.94 |
| 1.7 | 1.29 | 1.73 | 2.73 | 1.04 | 1.46 | 1.94 |
| 1.8 | 1.28 | 1.77 | 2.71 | 1.03 | 1.48 | 1.94 |
| 1.9 | 1.27 | 1.81 | 2.70 | 1.03 | 1.50 | 1.93 |
| 2 | 1.26 | 1.86 | 2.68 | 1.03 | 1.52 | 1.92 |
| 2.1 | 1.25 | 1.91 | 2.59 | 1.02 | 1.55 | 1.88 |
| 2.2 | 1.23 | 1.98 | 2.50 | 1.01 | 1.57 | 1.83 |
| 2.3 | 1.23 | 2.04 | 2.42 | 1.01 | 1.60 | 1.79 |
| 2.4 | 1.22 | 2.11 | 2.35 | 1.01 | 1.62 | 1.75 |
| 2.5 | 1.22 | 2.18 | 2.28 | 1.00 | 1.64 | 1.71 |
| 2.6 | 1.23 | 2.28 | 2.33 | 1.00 | 1.68 | 1.72 |
| 2.7 | 1.23 | 2.39 | 2.37 | 1.00 | 1.72 | 1.72 |
| 2.8 | 1.24 | 2.49 | 2.41 | 1.00 | 1.76 | 1.73 |
| 2.9 | 1.24 | 2.59 | 2.45 | 1.00 | 1.79 | 1.74 |
| 3 | 1.25 | 2.70 | 2.49 | 1.00 | 1.83 | 1.74 |
| 3.1 | 1.25 | 2.69 | 2.54 | 1.00 | 1.82 | 1.75 |
| 3.2 | 1.26 | 2.67 | 2.58 | 1.00 | 1.81 | 1.77 |
| 3.3 | 1.26 | 2.66 | 2.62 | 1.00 | 1.80 | 1.78 |
| 3.4 | 1.27 | 2.65 | 2.66 | 1.00 | 1.78 | 1.79 |
| 3.5 | 1.27 | 2.64 | 2.70 | 1.00 | 1.77 | 1.80 |
| 3.6 | 1.28 | 2.63 | 2.74 | 1.01 | 1.76 | 1.81 |
| 3.7 | 1.29 | 2.63 | 2.78 | 1.01 | 1.76 | 1.81 |
| 3.8 | 1.30 | 2.62 | 2.82 | 1.01 | 1.75 | 1.82 |
| 3.9 | 1.31 | 2.61 | 2.86 | 1.01 | 1.74 | 1.83 |
| 4 | 1.32 | 2.61 | 2.90 | 1.01 | 1.73 | 1.83 |
| 4.1 | 1.32 | 2.60 | 2.95 | 1.02 | 1.72 | 1.85 |
| 4.2 | 1.32 | 2.59 | 3.00 | 1.02 | 1.72 | 1.87 |
| 4.3 | 1.33 | 2.58 | 3.06 | 1.02 | 1.71 | 1.88 |
| 4.4 | 1.33 | 2.58 | 3.11 | 1.02 | 1.70 | 1.90 |
| 4.5 | 1.34 | 2.57 | 3.16 | 1.02 | 1.70 | 1.91 |
| 4.6 | 1.34 | 2.56 | 3.21 | 1.02 | 1.69 | 1.93 |
| 4.7 | 1.35 | 2.56 | 3.26 | 1.03 | 1.69 | 1.94 |
| 4.8 | 1.35 | 2.55 | 3.31 | 1.03 | 1.68 | 1.95 |
| 4.9 | 1.36 | 2.54 | 3.35 | 1.03 | 1.68 | 1.96 |
| 5 | 1.37 | 2.54 | 3.40 | 1.03 | 1.67 | 1.97 |

**Tabla J. 11** Valor de la mediana y la media de los residuales normalizados para eventos de interplaca

| Te, [s] | Residuales | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Media | | | Mediana | | |
| | Abrahamson | Zhao | Montalva | Abrahamson | Zhao | Montalva |
| 0 | -0.78 | -0.98 | -1.13 | -0.69 | -0.89 | -1.04 |
| 0.1 | -0.97 | -0.87 | -1.14 | -0.95 | -0.89 | -1.18 |
| 0.2 | -0.87 | -1.20 | -1.22 | -0.83 | -1.11 | -1.24 |
| 0.3 | -0.49 | -1.25 | -1.30 | -0.42 | -1.10 | -1.27 |
| 0.4 | -0.28 | -1.10 | -1.33 | -0.23 | -0.90 | -1.24 |
| 0.5 | 0.07 | -1.01 | -1.33 | 0.23 | -0.85 | -1.26 |
| 0.6 | 0.16 | -0.93 | -1.33 | 0.21 | -0.75 | -1.26 |
| 0.7 | 0.30 | -0.81 | -1.27 | 0.21 | -0.60 | -1.02 |
| 0.8 | 0.39 | -0.72 | -1.18 | 0.33 | -0.53 | -1.05 |
| 0.9 | 0.44 | -0.64 | -1.08 | 0.35 | -0.44 | -0.89 |
| 1 | 0.44 | -0.58 | -1.04 | 0.37 | -0.42 | -0.90 |
| 1.1 | 0.47 | -0.54 | -0.99 | 0.38 | -0.43 | -0.93 |
| 1.2 | 0.49 | -0.51 | -0.95 | 0.38 | -0.44 | -0.90 |
| 1.3 | 0.51 | -0.47 | -0.93 | 0.36 | -0.46 | -0.93 |
| 1.4 | 0.49 | -0.44 | -0.93 | 0.35 | -0.41 | -0.89 |
| 1.5 | 0.48 | -0.42 | -0.93 | 0.31 | -0.40 | -0.91 |
| 1.6 | 0.45 | -0.46 | -0.95 | 0.31 | -0.42 | -0.88 |
| 1.7 | 0.42 | -0.50 | -0.96 | 0.28 | -0.43 | -0.91 |
| 1.8 | 0.39 | -0.54 | -0.98 | 0.27 | -0.42 | -0.93 |
| 1.9 | 0.36 | -0.58 | -0.99 | 0.29 | -0.47 | -0.92 |
| 2 | 0.34 | -0.61 | -1.01 | 0.30 | -0.50 | -0.90 |
| 2.1 | 0.29 | -0.67 | -1.01 | 0.23 | -0.56 | -0.92 |
| 2.2 | 0.25 | -0.72 | -1.00 | 0.17 | -0.67 | -0.92 |
| 2.3 | 0.20 | -0.77 | -1.00 | 0.11 | -0.74 | -0.95 |
| 2.4 | 0.16 | -0.82 | -1.00 | 0.11 | -0.75 | -0.93 |
| 2.5 | 0.12 | -0.87 | -1.00 | 0.07 | -0.78 | -0.91 |
| 2.6 | 0.10 | -0.92 | -1.04 | 0.01 | -0.81 | -0.97 |
| 2.7 | 0.08 | -0.98 | -1.08 | -0.01 | -0.86 | -1.04 |
| 2.8 | 0.06 | -1.03 | -1.12 | -0.03 | -0.92 | -1.09 |
| 2.9 | 0.03 | -1.08 | -1.16 | 0.02 | -1.00 | -1.08 |
| 3 | 0.01 | -1.13 | -1.19 | 0.03 | -1.09 | -1.13 |
| 3.1 | -0.02 | -1.14 | -1.22 | -0.02 | -1.08 | -1.17 |
| 3.2 | -0.05 | -1.16 | -1.25 | -0.07 | -1.10 | -1.21 |
| 3.3 | -0.08 | -1.18 | -1.28 | -0.07 | -1.10 | -1.22 |
| 3.4 | -0.11 | -1.19 | -1.31 | -0.11 | -1.13 | -1.25 |
| 3.5 | -0.14 | -1.20 | -1.33 | -0.14 | -1.11 | -1.28 |
| 3.6 | -0.17 | -1.22 | -1.36 | -0.18 | -1.11 | -1.25 |
| 3.7 | -0.20 | -1.23 | -1.38 | -0.22 | -1.10 | -1.31 |
| 3.8 | -0.23 | -1.25 | -1.41 | -0.25 | -1.13 | -1.33 |
| 3.9 | -0.25 | -1.26 | -1.43 | -0.25 | -1.17 | -1.39 |
| 4 | -0.28 | -1.27 | -1.45 | -0.27 | -1.19 | -1.39 |
| 4.1 | -0.29 | -1.28 | -1.48 | -0.30 | -1.19 | -1.40 |
| 4.2 | -0.31 | -1.29 | -1.51 | -0.31 | -1.20 | -1.42 |
| 4.3 | -0.32 | -1.29 | -1.54 | -0.27 | -1.21 | -1.48 |
| 4.4 | -0.33 | -1.30 | -1.56 | -0.24 | -1.21 | -1.57 |
| 4.5 | -0.35 | -1.30 | -1.59 | -0.28 | -1.22 | -1.62 |
| 4.6 | -0.36 | -1.31 | -1.61 | -0.28 | -1.26 | -1.62 |
| 4.7 | -0.37 | -1.32 | -1.64 | -0.28 | -1.29 | -1.62 |
| 4.8 | -0.38 | -1.32 | -1.66 | -0.29 | -1.31 | -1.63 |
| 4.9 | -0.40 | -1.33 | -1.69 | -0.27 | -1.34 | -1.64 |
| 5 | -0.41 | -1.33 | -1.71 | -0.29 | -1.38 | -1.63 |

**Tabla J. 12** Valores de desviación estándar de residuales y de LH para eventos de interplaca

| Te, [s] | Std. Residuales | | | LH | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Abrahamson | Zhao | Montalva | Abrahamson | Zhao | Montalva |
| 0 | 1.49 | 1.66 | 1.40 | 0.26 | 0.20 | 0.25 |
| 0.1 | 1.60 | 1.50 | 1.41 | 0.22 | 0.23 | 0.19 |
| 0.2 | 1.53 | 1.50 | 1.44 | 0.26 | 0.21 | 0.18 |
| 0.3 | 1.52 | 1.61 | 1.44 | 0.33 | 0.24 | 0.18 |
| 0.4 | 1.57 | 1.69 | 1.48 | 0.37 | 0.25 | 0.17 |
| 0.5 | 1.60 | 1.74 | 1.59 | 0.31 | 0.24 | 0.17 |
| 0.6 | 1.57 | 1.66 | 1.56 | 0.33 | 0.25 | 0.15 |
| 0.7 | 1.59 | 1.60 | 1.52 | 0.32 | 0.26 | 0.21 |
| 0.8 | 1.64 | 1.56 | 1.52 | 0.31 | 0.28 | 0.23 |
| 0.9 | 1.61 | 1.48 | 1.49 | 0.31 | 0.32 | 0.26 |
| 1 | 1.59 | 1.43 | 1.49 | 0.29 | 0.32 | 0.24 |
| 1.1 | 1.56 | 1.38 | 1.46 | 0.28 | 0.32 | 0.25 |
| 1.2 | 1.53 | 1.34 | 1.45 | 0.28 | 0.34 | 0.27 |
| 1.3 | 1.53 | 1.32 | 1.47 | 0.28 | 0.34 | 0.25 |
| 1.4 | 1.54 | 1.32 | 1.51 | 0.29 | 0.34 | 0.24 |
| 1.5 | 1.55 | 1.33 | 1.55 | 0.29 | 0.35 | 0.20 |
| 1.6 | 1.53 | 1.31 | 1.54 | 0.28 | 0.33 | 0.23 |
| 1.7 | 1.52 | 1.30 | 1.53 | 0.28 | 0.32 | 0.23 |
| 1.8 | 1.52 | 1.29 | 1.53 | 0.30 | 0.30 | 0.24 |
| 1.9 | 1.52 | 1.30 | 1.54 | 0.32 | 0.30 | 0.23 |
| 2 | 1.53 | 1.30 | 1.54 | 0.32 | 0.30 | 0.22 |
| 2.1 | 1.52 | 1.30 | 1.52 | 0.31 | 0.32 | 0.23 |
| 2.2 | 1.52 | 1.30 | 1.50 | 0.33 | 0.30 | 0.25 |
| 2.3 | 1.52 | 1.31 | 1.48 | 0.34 | 0.29 | 0.24 |
| 2.4 | 1.53 | 1.32 | 1.48 | 0.33 | 0.29 | 0.24 |
| 2.5 | 1.54 | 1.33 | 1.47 | 0.33 | 0.26 | 0.23 |
| 2.6 | 1.55 | 1.35 | 1.49 | 0.31 | 0.24 | 0.24 |
| 2.7 | 1.56 | 1.37 | 1.51 | 0.30 | 0.24 | 0.22 |
| 2.8 | 1.57 | 1.39 | 1.53 | 0.30 | 0.23 | 0.21 |
| 2.9 | 1.58 | 1.42 | 1.55 | 0.30 | 0.22 | 0.19 |
| 3 | 1.59 | 1.44 | 1.58 | 0.29 | 0.21 | 0.19 |
| 3.1 | 1.60 | 1.44 | 1.58 | 0.28 | 0.20 | 0.19 |
| 3.2 | 1.60 | 1.44 | 1.59 | 0.29 | 0.20 | 0.18 |
| 3.3 | 1.60 | 1.44 | 1.59 | 0.29 | 0.21 | 0.17 |
| 3.4 | 1.61 | 1.44 | 1.60 | 0.28 | 0.21 | 0.17 |
| 3.5 | 1.61 | 1.44 | 1.61 | 0.30 | 0.20 | 0.17 |
| 3.6 | 1.61 | 1.45 | 1.62 | 0.31 | 0.20 | 0.16 |
| 3.7 | 1.62 | 1.45 | 1.62 | 0.30 | 0.19 | 0.15 |
| 3.8 | 1.63 | 1.46 | 1.63 | 0.30 | 0.19 | 0.14 |
| 3.9 | 1.63 | 1.46 | 1.64 | 0.30 | 0.19 | 0.14 |
| 4 | 1.64 | 1.47 | 1.65 | 0.28 | 0.19 | 0.13 |
| 4.1 | 1.64 | 1.46 | 1.67 | 0.28 | 0.19 | 0.12 |
| 4.2 | 1.64 | 1.46 | 1.68 | 0.28 | 0.18 | 0.12 |
| 4.3 | 1.64 | 1.46 | 1.70 | 0.28 | 0.18 | 0.12 |
| 4.4 | 1.64 | 1.46 | 1.71 | 0.27 | 0.17 | 0.11 |
| 4.5 | 1.64 | 1.46 | 1.73 | 0.26 | 0.17 | 0.10 |
| 4.6 | 1.64 | 1.46 | 1.75 | 0.27 | 0.17 | 0.09 |
| 4.7 | 1.65 | 1.46 | 1.76 | 0.27 | 0.17 | 0.10 |
| 4.8 | 1.65 | 1.46 | 1.78 | 0.26 | 0.16 | 0.10 |
| 4.9 | 1.65 | 1.46 | 1.80 | 0.26 | 0.16 | 0.09 |
| 5 | 1.66 | 1.46 | 1.82 | 0.25 | 0.15 | 0.09 |

## Eventos de la zona Benioff

**Tabla J. 13** Resultados del estimador LLH para eventos de la zona de Benioff

| Te, [s] | Mediana LLH | | | | Peso LLH | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Montalva | Abrahamson | Zhao | García | Montalva | Abrahamson | Zhao | García |
| 0 | 3.45 | 3.75 | 4.61 | 6.65 | 0.42 | 0.34 | 0.19 | 0.05 |
| 0.1 | 3.77 | 4.26 | 4.06 | 6.22 | 0.37 | 0.26 | 0.30 | 0.07 |
| 0.2 | 3.63 | 3.93 | 4.43 | 6.15 | 0.39 | 0.32 | 0.22 | 0.07 |
| 0.3 | 3.42 | 3.69 | 4.56 | 4.89 | 0.38 | 0.31 | 0.17 | 0.14 |
| 0.4 | 3.02 | 3.55 | 4.20 | 4.74 | 0.41 | 0.28 | 0.18 | 0.12 |
| 0.5 | 3.05 | 3.59 | 4.07 | 4.78 | 0.40 | 0.28 | 0.20 | 0.12 |
| 0.6 | 3.02 | 3.65 | 3.91 | 4.67 | 0.40 | 0.26 | 0.22 | 0.13 |
| 0.7 | 2.91 | 3.56 | 3.69 | 4.37 | 0.39 | 0.25 | 0.23 | 0.14 |
| 0.8 | 2.79 | 3.46 | 3.54 | 4.05 | 0.38 | 0.24 | 0.23 | 0.16 |
| 0.9 | 2.76 | 3.43 | 3.50 | 3.94 | 0.38 | 0.24 | 0.22 | 0.16 |
| 1 | 2.77 | 3.43 | 3.51 | 3.97 | 0.37 | 0.24 | 0.22 | 0.16 |
| 1.1 | 2.69 | 3.34 | 3.43 | 3.83 | 0.37 | 0.24 | 0.22 | 0.17 |
| 1.2 | 2.66 | 3.30 | 3.41 | 3.78 | 0.37 | 0.24 | 0.22 | 0.17 |
| 1.3 | 2.66 | 3.26 | 3.40 | 3.78 | 0.37 | 0.24 | 0.22 | 0.17 |
| 1.4 | 2.58 | 3.18 | 3.34 | 3.60 | 0.37 | 0.24 | 0.21 | 0.18 |
| 1.5 | 2.53 | 3.14 | 3.33 | 3.48 | 0.36 | 0.24 | 0.21 | 0.19 |
| 1.6 | 2.51 | 3.09 | 3.35 | 3.45 | 0.36 | 0.24 | 0.20 | 0.19 |
| 1.7 | 2.50 | 3.06 | 3.39 | 3.44 | 0.36 | 0.25 | 0.20 | 0.19 |
| 1.8 | 2.51 | 3.03 | 3.44 | 3.45 | 0.37 | 0.25 | 0.19 | 0.19 |
| 1.9 | 2.52 | 3.02 | 3.50 | 3.46 | 0.37 | 0.26 | 0.19 | 0.19 |
| 2 | 2.54 | 3.02 | 3.57 | 3.50 | 0.37 | 0.26 | 0.18 | 0.19 |
| 2.1 | 2.55 | 3.01 | 3.60 | 3.47 | 0.37 | 0.26 | 0.18 | 0.19 |
| 2.2 | 2.56 | 3.01 | 3.64 | 3.46 | 0.36 | 0.27 | 0.17 | 0.20 |
| 2.3 | 2.58 | 3.02 | 3.68 | 3.46 | 0.36 | 0.27 | 0.17 | 0.20 |
| 2.4 | 2.61 | 3.03 | 3.73 | 3.47 | 0.36 | 0.27 | 0.17 | 0.20 |
| 2.5 | 2.64 | 3.05 | 3.78 | 3.49 | 0.36 | 0.27 | 0.16 | 0.20 |
| 2.6 | 2.66 | 3.04 | 3.83 | 3.48 | 0.36 | 0.28 | 0.16 | 0.20 |
| 2.7 | 2.69 | 3.03 | 3.88 | 3.49 | 0.36 | 0.28 | 0.16 | 0.21 |
| 2.8 | 2.73 | 3.03 | 3.94 | 3.50 | 0.35 | 0.29 | 0.15 | 0.21 |
| 2.9 | 2.77 | 3.03 | 4.00 | 3.52 | 0.35 | 0.29 | 0.15 | 0.21 |
| 3 | 2.82 | 3.04 | 4.07 | 3.55 | 0.35 | 0.30 | 0.15 | 0.21 |
| 3.1 | 2.83 | 3.05 | 4.11 | 3.59 | 0.35 | 0.30 | 0.14 | 0.21 |
| 3.2 | 2.85 | 3.05 | 4.16 | 3.63 | 0.35 | 0.30 | 0.14 | 0.20 |
| 3.3 | 2.87 | 3.06 | 4.21 | 3.68 | 0.35 | 0.31 | 0.14 | 0.20 |
| 3.4 | 2.90 | 3.07 | 4.26 | 3.73 | 0.35 | 0.31 | 0.14 | 0.20 |
| 3.5 | 2.92 | 3.08 | 4.31 | 3.78 | 0.35 | 0.32 | 0.14 | 0.19 |
| 3.6 | 2.95 | 3.09 | 4.36 | 3.84 | 0.35 | 0.32 | 0.13 | 0.19 |
| 3.7 | 2.98 | 3.11 | 4.41 | 3.91 | 0.36 | 0.33 | 0.13 | 0.19 |
| 3.8 | 3.02 | 3.12 | 4.46 | 3.97 | 0.36 | 0.33 | 0.13 | 0.18 |
| 3.9 | 3.05 | 3.14 | 4.51 | 4.04 | 0.36 | 0.33 | 0.13 | 0.18 |
| 4 | 3.09 | 3.16 | 4.57 | 4.11 | 0.36 | 0.34 | 0.13 | 0.18 |
| 4.1 | 3.13 | 3.16 | 4.56 | 4.17 | 0.35 | 0.35 | 0.13 | 0.17 |
| 4.2 | 3.17 | 3.15 | 4.55 | 4.22 | 0.35 | 0.35 | 0.13 | 0.17 |
| 4.3 | 3.22 | 3.15 | 4.55 | 4.27 | 0.34 | 0.36 | 0.14 | 0.16 |
| 4.4 | 3.26 | 3.15 | 4.55 | 4.33 | 0.34 | 0.36 | 0.14 | 0.16 |
| 4.5 | 3.31 | 3.15 | 4.54 | 4.39 | 0.33 | 0.37 | 0.14 | 0.16 |
| 4.6 | 3.36 | 3.16 | 4.54 | 4.45 | 0.33 | 0.38 | 0.14 | 0.15 |
| 4.7 | 3.41 | 3.16 | 4.54 | 4.51 | 0.32 | 0.38 | 0.15 | 0.15 |
| 4.8 | 3.47 | 3.16 | 4.54 | 4.57 | 0.32 | 0.39 | 0.15 | 0.15 |
| 4.9 | 3.52 | 3.17 | 4.54 | 4.63 | 0.31 | 0.40 | 0.15 | 0.14 |
| 5 | 3.58 | 3.17 | 4.54 | 4.69 | 0.30 | 0.40 | 0.16 | 0.14 |

**Tabla J. 14** Estimadores de la distancia Euclidiana para eventos de la zona de Benioff

| Te, [s] | EDR | | | | k^2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Montalva | Abrahamson | Zhao | García | Montalva | Abrahamson | Zhao | García |
| 0 | 1.56 | 1.66 | 2.00 | 2.09 | 1.07 | 1.18 | 1.33 | 1.15 |
| 0.1 | 1.84 | 1.74 | 1.93 | 2.57 | 1.09 | 1.13 | 1.18 | 1.26 |
| 0.2 | 1.67 | 1.65 | 2.20 | 1.91 | 1.02 | 1.13 | 1.35 | 1.13 |
| 0.3 | 1.55 | 1.57 | 2.31 | 1.55 | 1.02 | 1.13 | 1.46 | 1.07 |
| 0.4 | 1.42 | 1.51 | 2.17 | 1.54 | 1.04 | 1.11 | 1.47 | 1.10 |
| 0.5 | 1.42 | 1.48 | 2.11 | 1.58 | 1.09 | 1.08 | 1.48 | 1.16 |
| 0.6 | 1.45 | 1.49 | 2.08 | 1.61 | 1.14 | 1.08 | 1.49 | 1.18 |
| 0.7 | 1.40 | 1.44 | 1.97 | 1.55 | 1.15 | 1.06 | 1.46 | 1.17 |
| 0.8 | 1.35 | 1.40 | 1.90 | 1.47 | 1.15 | 1.05 | 1.46 | 1.16 |
| 0.9 | 1.35 | 1.39 | 1.87 | 1.46 | 1.17 | 1.05 | 1.44 | 1.16 |
| 1 | 1.39 | 1.40 | 1.87 | 1.49 | 1.20 | 1.05 | 1.43 | 1.18 |
| 1.1 | 1.37 | 1.37 | 1.83 | 1.46 | 1.21 | 1.05 | 1.43 | 1.18 |
| 1.2 | 1.37 | 1.36 | 1.83 | 1.47 | 1.22 | 1.05 | 1.43 | 1.19 |
| 1.3 | 1.39 | 1.36 | 1.83 | 1.50 | 1.24 | 1.06 | 1.43 | 1.21 |
| 1.4 | 1.34 | 1.33 | 1.81 | 1.44 | 1.22 | 1.06 | 1.43 | 1.20 |
| 1.5 | 1.31 | 1.33 | 1.82 | 1.40 | 1.21 | 1.06 | 1.43 | 1.19 |
| 1.6 | 1.27 | 1.32 | 1.87 | 1.36 | 1.19 | 1.06 | 1.46 | 1.18 |
| 1.7 | 1.25 | 1.31 | 1.92 | 1.33 | 1.18 | 1.07 | 1.48 | 1.17 |
| 1.8 | 1.23 | 1.31 | 1.98 | 1.30 | 1.17 | 1.07 | 1.51 | 1.16 |
| 1.9 | 1.22 | 1.31 | 2.04 | 1.29 | 1.17 | 1.08 | 1.53 | 1.16 |
| 2 | 1.22 | 1.31 | 2.11 | 1.27 | 1.16 | 1.08 | 1.56 | 1.15 |
| 2.1 | 1.21 | 1.32 | 2.14 | 1.27 | 1.16 | 1.09 | 1.57 | 1.15 |
| 2.2 | 1.21 | 1.32 | 2.17 | 1.26 | 1.15 | 1.09 | 1.59 | 1.15 |
| 2.3 | 1.21 | 1.33 | 2.21 | 1.26 | 1.15 | 1.10 | 1.60 | 1.15 |
| 2.4 | 1.21 | 1.34 | 2.25 | 1.27 | 1.15 | 1.10 | 1.61 | 1.16 |
| 2.5 | 1.22 | 1.36 | 2.28 | 1.28 | 1.15 | 1.11 | 1.62 | 1.16 |
| 2.6 | 1.22 | 1.36 | 2.32 | 1.27 | 1.14 | 1.11 | 1.64 | 1.15 |
| 2.7 | 1.22 | 1.35 | 2.37 | 1.27 | 1.14 | 1.11 | 1.66 | 1.15 |
| 2.8 | 1.23 | 1.36 | 2.41 | 1.27 | 1.14 | 1.11 | 1.68 | 1.15 |
| 2.9 | 1.24 | 1.36 | 2.45 | 1.28 | 1.14 | 1.11 | 1.70 | 1.15 |
| 3 | 1.25 | 1.36 | 2.49 | 1.28 | 1.15 | 1.11 | 1.71 | 1.15 |
| 3.1 | 1.26 | 1.37 | 2.51 | 1.28 | 1.15 | 1.11 | 1.72 | 1.14 |
| 3.2 | 1.26 | 1.37 | 2.54 | 1.28 | 1.15 | 1.12 | 1.73 | 1.14 |
| 3.3 | 1.27 | 1.37 | 2.56 | 1.28 | 1.15 | 1.12 | 1.73 | 1.14 |
| 3.4 | 1.28 | 1.38 | 2.58 | 1.29 | 1.15 | 1.12 | 1.74 | 1.13 |
| 3.5 | 1.29 | 1.38 | 2.60 | 1.29 | 1.15 | 1.12 | 1.74 | 1.13 |
| 3.6 | 1.31 | 1.39 | 2.62 | 1.30 | 1.15 | 1.12 | 1.75 | 1.13 |
| 3.7 | 1.32 | 1.39 | 2.64 | 1.31 | 1.16 | 1.12 | 1.75 | 1.13 |
| 3.8 | 1.33 | 1.40 | 2.66 | 1.32 | 1.16 | 1.12 | 1.76 | 1.13 |
| 3.9 | 1.35 | 1.40 | 2.69 | 1.33 | 1.16 | 1.12 | 1.76 | 1.13 |
| 4 | 1.36 | 1.41 | 2.71 | 1.34 | 1.16 | 1.12 | 1.76 | 1.13 |
| 4.1 | 1.38 | 1.41 | 2.71 | 1.34 | 1.17 | 1.12 | 1.76 | 1.12 |
| 4.2 | 1.39 | 1.40 | 2.70 | 1.35 | 1.17 | 1.12 | 1.76 | 1.12 |
| 4.3 | 1.41 | 1.40 | 2.70 | 1.35 | 1.18 | 1.12 | 1.76 | 1.12 |
| 4.4 | 1.42 | 1.40 | 2.70 | 1.36 | 1.18 | 1.11 | 1.76 | 1.12 |
| 4.5 | 1.44 | 1.40 | 2.70 | 1.37 | 1.18 | 1.11 | 1.76 | 1.12 |
| 4.6 | 1.45 | 1.39 | 2.70 | 1.37 | 1.19 | 1.11 | 1.76 | 1.12 |
| 4.7 | 1.47 | 1.39 | 2.70 | 1.38 | 1.19 | 1.11 | 1.76 | 1.11 |
| 4.8 | 1.49 | 1.39 | 2.70 | 1.39 | 1.20 | 1.11 | 1.76 | 1.11 |
| 4.9 | 1.50 | 1.39 | 2.70 | 1.39 | 1.20 | 1.11 | 1.76 | 1.11 |
| 5 | 1.52 | 1.39 | 2.70 | 1.40 | 1.20 | 1.10 | 1.76 | 1.11 |

**Tabla J. 15** Resultados de la media y la mediana de los residuales normalizados para eventos de la zona de Benioff

| Te, [s] | Residuales | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Media | | | | Mediana | | | |
| | Montalva | Abrahamson | Zhao | García | Montalva | Abrahamson | Zhao | García |
| 0 | -0.57 | -0.81 | -1.16 | -1.30 | -0.69 | -0.81 | -1.03 | -1.16 |
| 0.1 | -0.71 | -0.83 | -0.87 | -1.53 | -0.85 | -0.88 | -0.79 | -1.35 |
| 0.2 | -0.29 | -0.69 | -1.14 | -0.97 | -0.43 | -0.69 | -1.07 | -0.70 |
| 0.3 | -0.12 | -0.59 | -1.22 | -0.22 | -0.23 | -0.65 | -1.12 | -0.09 |
| 0.4 | -0.05 | -0.52 | -1.06 | -0.20 | -0.23 | -0.66 | -1.07 | -0.16 |
| 0.5 | 0.00 | -0.31 | -0.89 | 0.22 | -0.16 | -0.53 | -0.96 | 0.10 |
| 0.6 | 0.12 | -0.26 | -0.77 | 0.22 | -0.07 | -0.45 | -0.80 | 0.17 |
| 0.7 | 0.16 | -0.19 | -0.72 | 0.17 | 0.06 | -0.40 | -0.80 | 0.21 |
| 0.8 | 0.18 | -0.18 | -0.73 | 0.13 | 0.05 | -0.39 | -0.83 | 0.15 |
| 0.9 | 0.22 | -0.19 | -0.75 | 0.17 | 0.14 | -0.37 | -0.86 | 0.15 |
| 1 | 0.27 | -0.17 | -0.74 | 0.23 | 0.21 | -0.36 | -0.77 | 0.21 |
| 1.1 | 0.28 | -0.17 | -0.75 | 0.30 | 0.28 | -0.34 | -0.74 | 0.34 |
| 1.2 | 0.30 | -0.17 | -0.77 | 0.38 | 0.34 | -0.23 | -0.75 | 0.35 |
| 1.3 | 0.31 | -0.17 | -0.77 | 0.44 | 0.37 | -0.23 | -0.76 | 0.41 |
| 1.4 | 0.26 | -0.23 | -0.82 | 0.42 | 0.33 | -0.31 | -0.77 | 0.42 |
| 1.5 | 0.21 | -0.29 | -0.86 | 0.41 | 0.23 | -0.39 | -0.82 | 0.39 |
| 1.6 | 0.17 | -0.32 | -0.92 | 0.38 | 0.22 | -0.41 | -0.88 | 0.38 |
| 1.7 | 0.13 | -0.35 | -0.97 | 0.35 | 0.20 | -0.42 | -0.93 | 0.30 |
| 1.8 | 0.09 | -0.38 | -1.02 | 0.32 | 0.17 | -0.44 | -0.99 | 0.26 |
| 1.9 | 0.06 | -0.40 | -1.07 | 0.29 | 0.12 | -0.45 | -1.04 | 0.22 |
| 2 | 0.02 | -0.43 | -1.12 | 0.26 | 0.06 | -0.46 | -1.10 | 0.22 |
| 2.1 | 0.01 | -0.44 | -1.14 | 0.23 | 0.06 | -0.49 | -1.09 | 0.17 |
| 2.2 | -0.01 | -0.46 | -1.16 | 0.21 | 0.05 | -0.51 | -1.11 | 0.15 |
| 2.3 | -0.02 | -0.48 | -1.18 | 0.18 | 0.00 | -0.50 | -1.15 | 0.16 |
| 2.4 | -0.04 | -0.49 | -1.20 | 0.16 | -0.01 | -0.52 | -1.15 | 0.19 |
| 2.5 | -0.05 | -0.50 | -1.22 | 0.14 | 0.03 | -0.54 | -1.17 | 0.20 |
| 2.6 | -0.08 | -0.51 | -1.24 | 0.10 | -0.01 | -0.53 | -1.18 | 0.20 |
| 2.7 | -0.11 | -0.52 | -1.27 | 0.07 | -0.04 | -0.52 | -1.21 | 0.18 |
| 2.8 | -0.14 | -0.53 | -1.30 | 0.03 | -0.09 | -0.54 | -1.23 | 0.11 |
| 2.9 | -0.17 | -0.53 | -1.32 | 0.00 | -0.11 | -0.53 | -1.26 | 0.05 |
| 3 | -0.20 | -0.54 | -1.35 | -0.03 | -0.11 | -0.53 | -1.29 | 0.03 |
| 3.1 | -0.23 | -0.55 | -1.37 | -0.06 | -0.12 | -0.51 | -1.34 | -0.02 |
| 3.2 | -0.26 | -0.56 | -1.39 | -0.09 | -0.15 | -0.52 | -1.35 | -0.03 |
| 3.3 | -0.29 | -0.57 | -1.41 | -0.12 | -0.17 | -0.50 | -1.36 | -0.06 |
| 3.4 | -0.31 | -0.58 | -1.43 | -0.15 | -0.19 | -0.52 | -1.38 | -0.11 |
| 3.5 | -0.34 | -0.59 | -1.45 | -0.18 | -0.23 | -0.53 | -1.40 | -0.14 |
| 3.6 | -0.36 | -0.60 | -1.47 | -0.21 | -0.24 | -0.55 | -1.44 | -0.18 |
| 3.7 | -0.39 | -0.60 | -1.49 | -0.24 | -0.25 | -0.56 | -1.47 | -0.22 |
| 3.8 | -0.41 | -0.61 | -1.51 | -0.27 | -0.28 | -0.56 | -1.48 | -0.26 |
| 3.9 | -0.43 | -0.62 | -1.53 | -0.30 | -0.32 | -0.55 | -1.52 | -0.26 |
| 4 | -0.45 | -0.63 | -1.54 | -0.33 | -0.32 | -0.56 | -1.53 | -0.31 |
| 4.1 | -0.47 | -0.62 | -1.54 | -0.34 | -0.32 | -0.56 | -1.55 | -0.31 |
| 4.2 | -0.49 | -0.61 | -1.54 | -0.35 | -0.38 | -0.55 | -1.56 | -0.33 |
| 4.3 | -0.51 | -0.61 | -1.54 | -0.36 | -0.42 | -0.52 | -1.56 | -0.33 |
| 4.4 | -0.52 | -0.60 | -1.54 | -0.37 | -0.44 | -0.52 | -1.56 | -0.36 |
| 4.5 | -0.54 | -0.60 | -1.53 | -0.37 | -0.46 | -0.53 | -1.58 | -0.37 |
| 4.6 | -0.56 | -0.59 | -1.53 | -0.38 | -0.47 | -0.54 | -1.59 | -0.37 |
| 4.7 | -0.57 | -0.59 | -1.53 | -0.39 | -0.49 | -0.53 | -1.60 | -0.37 |
| 4.8 | -0.59 | -0.58 | -1.53 | -0.40 | -0.49 | -0.54 | -1.60 | -0.37 |
| 4.9 | -0.61 | -0.58 | -1.53 | -0.41 | -0.48 | -0.54 | -1.60 | -0.41 |
| 5 | -0.62 | -0.57 | -1.53 | -0.42 | -0.50 | -0.55 | -1.60 | -0.44 |

**Tabla J. 16** Resultados de la desviación estándar de residuales y del estimador LH para eventos de la zona de Benioff

| Te, [s] | Std. Residuales | | | | LH | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Montalva | Abrahamson | Zhao | García | Montalva | Abrahamson | Zhao | García |
| 0 | 1.62 | 1.64 | 1.80 | 2.39 | 0.26 | 0.22 | 0.17 | 0.11 |
| 0.1 | 1.70 | 1.84 | 1.74 | 2.11 | 0.23 | 0.20 | 0.22 | 0.12 |
| 0.2 | 1.77 | 1.77 | 1.73 | 2.40 | 0.34 | 0.22 | 0.20 | 0.13 |
| 0.3 | 1.70 | 1.71 | 1.74 | 2.22 | 0.33 | 0.23 | 0.16 | 0.14 |
| 0.4 | 1.53 | 1.68 | 1.69 | 2.17 | 0.35 | 0.22 | 0.16 | 0.12 |
| 0.5 | 1.55 | 1.74 | 1.74 | 2.18 | 0.29 | 0.21 | 0.15 | 0.10 |
| 0.6 | 1.53 | 1.78 | 1.73 | 2.15 | 0.31 | 0.21 | 0.19 | 0.14 |
| 0.7 | 1.47 | 1.75 | 1.66 | 2.05 | 0.33 | 0.23 | 0.22 | 0.14 |
| 0.8 | 1.42 | 1.71 | 1.59 | 1.94 | 0.37 | 0.23 | 0.23 | 0.17 |
| 0.9 | 1.39 | 1.70 | 1.57 | 1.90 | 0.36 | 0.23 | 0.22 | 0.20 |
| 1 | 1.39 | 1.70 | 1.58 | 1.90 | 0.35 | 0.25 | 0.20 | 0.19 |
| 1.1 | 1.35 | 1.66 | 1.54 | 1.84 | 0.37 | 0.28 | 0.22 | 0.21 |
| 1.2 | 1.33 | 1.65 | 1.52 | 1.81 | 0.38 | 0.30 | 0.24 | 0.22 |
| 1.3 | 1.33 | 1.63 | 1.51 | 1.80 | 0.36 | 0.32 | 0.24 | 0.22 |
| 1.4 | 1.29 | 1.59 | 1.46 | 1.73 | 0.39 | 0.30 | 0.26 | 0.25 |
| 1.5 | 1.28 | 1.56 | 1.43 | 1.68 | 0.41 | 0.31 | 0.28 | 0.26 |
| 1.6 | 1.27 | 1.53 | 1.40 | 1.68 | 0.42 | 0.33 | 0.27 | 0.26 |
| 1.7 | 1.27 | 1.51 | 1.39 | 1.68 | 0.43 | 0.32 | 0.26 | 0.28 |
| 1.8 | 1.28 | 1.49 | 1.38 | 1.69 | 0.43 | 0.32 | 0.26 | 0.28 |
| 1.9 | 1.29 | 1.48 | 1.37 | 1.70 | 0.43 | 0.33 | 0.25 | 0.28 |
| 2 | 1.30 | 1.48 | 1.37 | 1.72 | 0.43 | 0.33 | 0.22 | 0.30 |
| 2.1 | 1.30 | 1.46 | 1.36 | 1.71 | 0.43 | 0.34 | 0.23 | 0.30 |
| 2.2 | 1.31 | 1.46 | 1.36 | 1.71 | 0.43 | 0.34 | 0.23 | 0.31 |
| 2.3 | 1.32 | 1.46 | 1.37 | 1.71 | 0.41 | 0.34 | 0.22 | 0.30 |
| 2.4 | 1.33 | 1.46 | 1.38 | 1.72 | 0.41 | 0.33 | 0.21 | 0.30 |
| 2.5 | 1.35 | 1.46 | 1.39 | 1.73 | 0.41 | 0.34 | 0.21 | 0.29 |
| 2.6 | 1.36 | 1.45 | 1.39 | 1.73 | 0.39 | 0.34 | 0.21 | 0.30 |
| 2.7 | 1.37 | 1.45 | 1.39 | 1.73 | 0.41 | 0.36 | 0.20 | 0.29 |
| 2.8 | 1.39 | 1.45 | 1.40 | 1.74 | 0.40 | 0.37 | 0.19 | 0.29 |
| 2.9 | 1.41 | 1.44 | 1.40 | 1.75 | 0.40 | 0.37 | 0.18 | 0.30 |
| 3 | 1.43 | 1.45 | 1.41 | 1.76 | 0.41 | 0.37 | 0.18 | 0.30 |
| 3.1 | 1.43 | 1.44 | 1.41 | 1.77 | 0.41 | 0.36 | 0.17 | 0.29 |
| 3.2 | 1.43 | 1.44 | 1.42 | 1.79 | 0.41 | 0.36 | 0.16 | 0.30 |
| 3.3 | 1.44 | 1.44 | 1.42 | 1.80 | 0.40 | 0.36 | 0.16 | 0.30 |
| 3.4 | 1.44 | 1.44 | 1.42 | 1.82 | 0.40 | 0.35 | 0.15 | 0.29 |
| 3.5 | 1.45 | 1.45 | 1.43 | 1.84 | 0.39 | 0.34 | 0.14 | 0.28 |
| 3.6 | 1.46 | 1.45 | 1.43 | 1.86 | 0.39 | 0.33 | 0.13 | 0.26 |
| 3.7 | 1.47 | 1.45 | 1.44 | 1.88 | 0.39 | 0.33 | 0.13 | 0.25 |
| 3.8 | 1.48 | 1.46 | 1.44 | 1.90 | 0.38 | 0.33 | 0.13 | 0.24 |
| 3.9 | 1.49 | 1.46 | 1.45 | 1.92 | 0.37 | 0.32 | 0.12 | 0.23 |
| 4 | 1.50 | 1.47 | 1.46 | 1.94 | 0.36 | 0.32 | 0.12 | 0.23 |
| 4.1 | 1.51 | 1.47 | 1.45 | 1.96 | 0.35 | 0.33 | 0.11 | 0.23 |
| 4.2 | 1.52 | 1.47 | 1.45 | 1.97 | 0.34 | 0.33 | 0.11 | 0.22 |
| 4.3 | 1.54 | 1.47 | 1.45 | 1.99 | 0.35 | 0.32 | 0.11 | 0.21 |
| 4.4 | 1.55 | 1.47 | 1.45 | 2.01 | 0.34 | 0.32 | 0.10 | 0.22 |
| 4.5 | 1.57 | 1.48 | 1.45 | 2.03 | 0.33 | 0.32 | 0.10 | 0.21 |
| 4.6 | 1.59 | 1.48 | 1.45 | 2.05 | 0.32 | 0.33 | 0.10 | 0.21 |
| 4.7 | 1.60 | 1.48 | 1.45 | 2.07 | 0.32 | 0.33 | 0.10 | 0.20 |
| 4.8 | 1.62 | 1.49 | 1.46 | 2.08 | 0.31 | 0.33 | 0.11 | 0.20 |
| 4.9 | 1.64 | 1.49 | 1.46 | 2.10 | 0.31 | 0.34 | 0.11 | 0.20 |
| 5 | 1.65 | 1.50 | 1.46 | 2.12 | 0.31 | 0.34 | 0.10 | 0.19 |

## Eventos del nido sísmico de Bucaramanga

**Tabla J. 17** Resultados del estadístico LLH para el Nido de Bucaramanga

| Te, [s] | Mediana LLH | | | Peso LLH | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Zhao | Abrahamson | Montalva | Zhao | Abrahamson | Montalva |
| 0 | 2.76 | 4.27 | 4.54 | 0.61 | 0.21 | 0.18 |
| 0.1 | 2.80 | 5.38 | 4.33 | 0.66 | 0.11 | 0.23 |
| 0.2 | 2.55 | 4.81 | 4.90 | 0.71 | 0.15 | 0.14 |
| 0.3 | 2.67 | 4.62 | 5.29 | 0.70 | 0.18 | 0.11 |
| 0.4 | 2.72 | 4.48 | 5.13 | 0.67 | 0.20 | 0.13 |
| 0.5 | 2.90 | 4.75 | 5.16 | 0.67 | 0.19 | 0.14 |
| 0.6 | 2.89 | 4.66 | 5.22 | 0.67 | 0.20 | 0.13 |
| 0.7 | 2.78 | 4.66 | 5.03 | 0.67 | 0.18 | 0.14 |
| 0.8 | 2.65 | 4.49 | 4.78 | 0.66 | 0.19 | 0.15 |
| 0.9 | 2.62 | 4.35 | 4.64 | 0.65 | 0.19 | 0.16 |
| 1 | 2.62 | 4.25 | 4.55 | 0.63 | 0.20 | 0.17 |
| 1.1 | 2.62 | 4.16 | 4.45 | 0.62 | 0.21 | 0.17 |
| 1.2 | 2.65 | 4.11 | 4.40 | 0.60 | 0.22 | 0.18 |
| 1.3 | 2.67 | 3.99 | 4.27 | 0.58 | 0.23 | 0.19 |
| 1.4 | 2.56 | 3.73 | 3.96 | 0.55 | 0.24 | 0.21 |
| 1.5 | 2.49 | 3.53 | 3.70 | 0.52 | 0.25 | 0.22 |
| 1.6 | 2.47 | 3.41 | 3.55 | 0.50 | 0.26 | 0.24 |
| 1.7 | 2.47 | 3.31 | 3.42 | 0.48 | 0.27 | 0.25 |
| 1.8 | 2.48 | 3.23 | 3.30 | 0.46 | 0.28 | 0.26 |
| 1.9 | 2.51 | 3.16 | 3.20 | 0.44 | 0.28 | 0.27 |
| 2 | 2.55 | 3.10 | 3.11 | 0.42 | 0.29 | 0.29 |
| 2.1 | 2.58 | 3.05 | 3.09 | 0.41 | 0.30 | 0.29 |
| 2.2 | 2.62 | 3.01 | 3.08 | 0.40 | 0.31 | 0.29 |
| 2.3 | 2.66 | 2.98 | 3.07 | 0.39 | 0.31 | 0.29 |
| 2.4 | 2.70 | 2.95 | 3.07 | 0.38 | 0.32 | 0.30 |
| 2.5 | 2.74 | 2.93 | 3.07 | 0.37 | 0.33 | 0.30 |
| 2.6 | 2.78 | 2.92 | 3.04 | 0.36 | 0.33 | 0.30 |
| 2.7 | 2.83 | 2.91 | 3.01 | 0.35 | 0.33 | 0.31 |
| 2.8 | 2.88 | 2.90 | 2.99 | 0.34 | 0.34 | 0.32 |
| 2.9 | 2.93 | 2.90 | 2.97 | 0.33 | 0.34 | 0.33 |
| 3 | 2.98 | 2.90 | 2.95 | 0.32 | 0.34 | 0.33 |
| 3.1 | 2.99 | 2.90 | 2.94 | 0.32 | 0.34 | 0.33 |
| 3.2 | 2.99 | 2.91 | 2.92 | 0.32 | 0.34 | 0.34 |
| 3.3 | 3.00 | 2.92 | 2.91 | 0.32 | 0.34 | 0.34 |
| 3.4 | 3.01 | 2.92 | 2.91 | 0.32 | 0.34 | 0.34 |
| 3.5 | 3.02 | 2.93 | 2.90 | 0.32 | 0.34 | 0.35 |
| 3.6 | 3.03 | 2.94 | 2.90 | 0.32 | 0.34 | 0.35 |
| 3.7 | 3.04 | 2.96 | 2.89 | 0.32 | 0.33 | 0.35 |
| 3.8 | 3.05 | 2.97 | 2.89 | 0.32 | 0.33 | 0.35 |
| 3.9 | 3.06 | 2.98 | 2.89 | 0.31 | 0.33 | 0.35 |
| 4 | 3.08 | 3.00 | 2.90 | 0.31 | 0.33 | 0.36 |
| 4.1 | 3.07 | 3.01 | 2.89 | 0.32 | 0.33 | 0.36 |
| 4.2 | 3.06 | 3.03 | 2.89 | 0.32 | 0.33 | 0.36 |
| 4.3 | 3.05 | 3.04 | 2.90 | 0.32 | 0.32 | 0.36 |
| 4.4 | 3.04 | 3.06 | 2.90 | 0.32 | 0.32 | 0.36 |
| 4.5 | 3.04 | 3.08 | 2.91 | 0.33 | 0.32 | 0.36 |
| 4.6 | 3.03 | 3.10 | 2.92 | 0.33 | 0.31 | 0.36 |
| 4.7 | 3.03 | 3.12 | 2.93 | 0.33 | 0.31 | 0.36 |
| 4.8 | 3.02 | 3.14 | 2.94 | 0.34 | 0.31 | 0.35 |
| 4.9 | 3.02 | 3.16 | 2.96 | 0.34 | 0.31 | 0.35 |
| 5 | 3.02 | 3.18 | 2.97 | 0.34 | 0.31 | 0.35 |

**Tabla J. 18** Resultados los estimadores para la distancia Euclidiana para el Nido de Bucaramanga

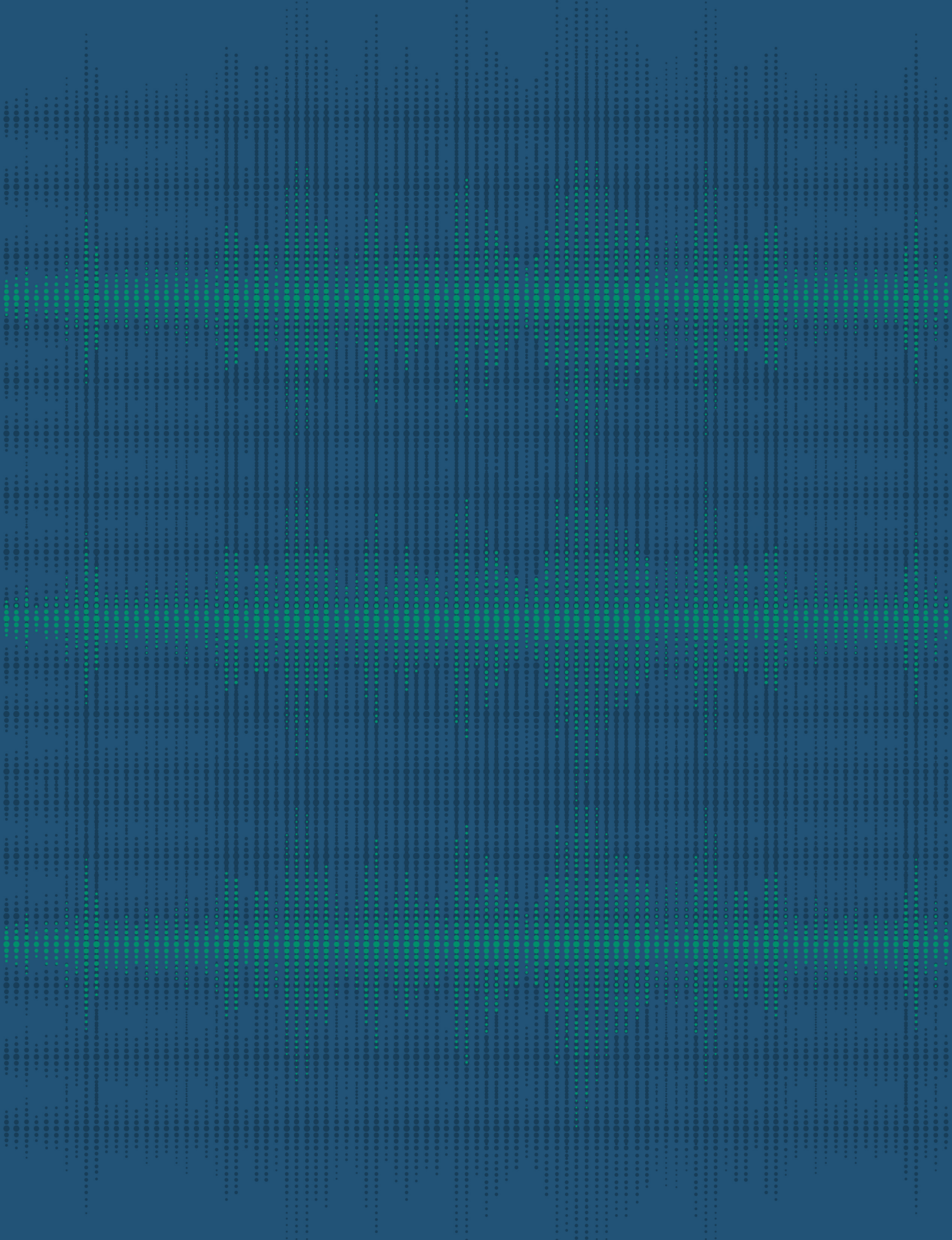
| Te, [s] | EDR | | | k^2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Zhao | Abrahamson | Montalva | Zhao | Abrahamson | Montalva |
| 0 | 1.08 | 2.12 | 2.54 | 1.03 | 1.38 | 1.46 |
| 0.1 | 1.28 | 2.37 | 2.40 | 1.01 | 1.33 | 1.30 |
| 0.2 | 1.13 | 2.36 | 2.99 | 1.02 | 1.42 | 1.50 |
| 0.3 | 1.18 | 2.39 | 3.30 | 1.09 | 1.48 | 1.63 |
| 0.4 | 1.25 | 2.36 | 3.43 | 1.16 | 1.49 | 1.76 |
| 0.5 | 1.41 | 2.49 | 3.39 | 1.25 | 1.51 | 1.83 |
| 0.6 | 1.49 | 2.37 | 3.56 | 1.32 | 1.45 | 1.95 |
| 0.7 | 1.46 | 2.32 | 3.49 | 1.33 | 1.42 | 1.98 |
| 0.8 | 1.40 | 2.21 | 3.40 | 1.32 | 1.39 | 2.01 |
| 0.9 | 1.39 | 2.10 | 3.35 | 1.32 | 1.34 | 2.03 |
| 1 | 1.41 | 2.01 | 3.33 | 1.34 | 1.31 | 2.04 |
| 1.1 | 1.43 | 1.96 | 3.34 | 1.36 | 1.29 | 2.08 |
| 1.2 | 1.48 | 1.92 | 3.34 | 1.39 | 1.27 | 2.09 |
| 1.3 | 1.51 | 1.84 | 3.25 | 1.41 | 1.25 | 2.07 |
| 1.4 | 1.45 | 1.71 | 3.06 | 1.39 | 1.21 | 2.05 |
| 1.5 | 1.41 | 1.60 | 2.87 | 1.38 | 1.18 | 2.01 |
| 1.6 | 1.44 | 1.54 | 2.69 | 1.41 | 1.16 | 1.96 |
| 1.7 | 1.48 | 1.49 | 2.53 | 1.45 | 1.15 | 1.91 |
| 1.8 | 1.54 | 1.44 | 2.37 | 1.50 | 1.13 | 1.85 |
| 1.9 | 1.61 | 1.40 | 2.23 | 1.55 | 1.12 | 1.79 |
| 2 | 1.69 | 1.37 | 2.11 | 1.60 | 1.10 | 1.74 |
| 2.1 | 1.74 | 1.34 | 2.05 | 1.63 | 1.10 | 1.70 |
| 2.2 | 1.79 | 1.32 | 1.99 | 1.66 | 1.09 | 1.66 |
| 2.3 | 1.84 | 1.30 | 1.94 | 1.69 | 1.08 | 1.63 |
| 2.4 | 1.89 | 1.28 | 1.90 | 1.72 | 1.07 | 1.59 |
| 2.5 | 1.95 | 1.27 | 1.86 | 1.74 | 1.07 | 1.56 |
| 2.6 | 2.01 | 1.27 | 1.80 | 1.79 | 1.07 | 1.54 |
| 2.7 | 2.07 | 1.26 | 1.75 | 1.83 | 1.07 | 1.51 |
| 2.8 | 2.14 | 1.26 | 1.70 | 1.87 | 1.07 | 1.49 |
| 2.9 | 2.21 | 1.27 | 1.66 | 1.91 | 1.07 | 1.47 |
| 3 | 2.27 | 1.27 | 1.62 | 1.94 | 1.07 | 1.44 |
| 3.1 | 2.26 | 1.27 | 1.61 | 1.94 | 1.08 | 1.43 |
| 3.2 | 2.25 | 1.28 | 1.59 | 1.93 | 1.08 | 1.43 |
| 3.3 | 2.24 | 1.29 | 1.58 | 1.92 | 1.09 | 1.42 |
| 3.4 | 2.23 | 1.30 | 1.57 | 1.91 | 1.09 | 1.41 |
| 3.5 | 2.22 | 1.31 | 1.56 | 1.91 | 1.09 | 1.40 |
| 3.6 | 2.21 | 1.32 | 1.55 | 1.90 | 1.10 | 1.39 |
| 3.7 | 2.20 | 1.32 | 1.54 | 1.89 | 1.10 | 1.39 |
| 3.8 | 2.19 | 1.33 | 1.53 | 1.88 | 1.11 | 1.38 |
| 3.9 | 2.19 | 1.34 | 1.52 | 1.87 | 1.11 | 1.37 |
| 4 | 2.18 | 1.35 | 1.52 | 1.87 | 1.11 | 1.36 |
| 4.1 | 2.16 | 1.37 | 1.51 | 1.85 | 1.12 | 1.36 |
| 4.2 | 2.14 | 1.38 | 1.50 | 1.84 | 1.13 | 1.35 |
| 4.3 | 2.12 | 1.39 | 1.49 | 1.83 | 1.13 | 1.35 |
| 4.4 | 2.11 | 1.41 | 1.48 | 1.82 | 1.14 | 1.35 |
| 4.5 | 2.09 | 1.42 | 1.47 | 1.80 | 1.15 | 1.34 |
| 4.6 | 2.07 | 1.43 | 1.47 | 1.79 | 1.15 | 1.34 |
| 4.7 | 2.06 | 1.45 | 1.47 | 1.78 | 1.16 | 1.34 |
| 4.8 | 2.04 | 1.46 | 1.46 | 1.77 | 1.16 | 1.33 |
| 4.9 | 2.03 | 1.48 | 1.46 | 1.76 | 1.17 | 1.33 |
| 5 | 2.02 | 1.49 | 1.46 | 1.75 | 1.18 | 1.33 |

**Tabla J. 19** Resultados para la media y la mediana de los residuales normalizados para el Nido de Bucaramanga

| Te, [s] | Residuales | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Media | | | Mediana | | |
| | Zhao | Abrahamson | Montalva | Zhao | Abrahamson | Montalva |
| 0 | -0.03 | 1.06 | 1.47 | -0.02 | 1.42 | 1.59 |
| 0.1 | 0.22 | 1.21 | 1.19 | 0.21 | 1.53 | 1.23 |
| 0.2 | -0.09 | 1.29 | 1.65 | -0.11 | 1.55 | 1.60 |
| 0.3 | -0.13 | 1.37 | 1.84 | -0.17 | 1.56 | 1.83 |
| 0.4 | 0.06 | 1.41 | 1.85 | 0.09 | 1.46 | 1.81 |
| 0.5 | 0.18 | 1.54 | 1.85 | 0.23 | 1.54 | 1.90 |
| 0.6 | 0.21 | 1.49 | 1.89 | 0.26 | 1.44 | 1.92 |
| 0.7 | 0.21 | 1.49 | 1.86 | 0.27 | 1.46 | 1.89 |
| 0.8 | 0.16 | 1.43 | 1.81 | 0.27 | 1.40 | 1.92 |
| 0.9 | 0.09 | 1.35 | 1.78 | 0.17 | 1.32 | 1.80 |
| 1 | 0.04 | 1.28 | 1.75 | 0.07 | 1.29 | 1.81 |
| 1.1 | 0.01 | 1.23 | 1.72 | 0.03 | 1.23 | 1.73 |
| 1.2 | -0.02 | 1.19 | 1.69 | 0.03 | 1.20 | 1.67 |
| 1.3 | -0.06 | 1.11 | 1.64 | -0.09 | 1.10 | 1.59 |
| 1.4 | -0.12 | 1.00 | 1.54 | -0.12 | 0.96 | 1.52 |
| 1.5 | -0.18 | 0.90 | 1.45 | -0.16 | 0.84 | 1.46 |
| 1.6 | -0.27 | 0.85 | 1.39 | -0.25 | 0.81 | 1.40 |
| 1.7 | -0.36 | 0.79 | 1.33 | -0.33 | 0.77 | 1.32 |
| 1.8 | -0.44 | 0.75 | 1.28 | -0.43 | 0.74 | 1.26 |
| 1.9 | -0.52 | 0.70 | 1.22 | -0.50 | 0.68 | 1.24 |
| 2 | -0.59 | 0.66 | 1.17 | -0.59 | 0.65 | 1.21 |
| 2.1 | -0.63 | 0.62 | 1.16 | -0.64 | 0.63 | 1.18 |
| 2.2 | -0.67 | 0.59 | 1.15 | -0.67 | 0.58 | 1.17 |
| 2.3 | -0.71 | 0.56 | 1.14 | -0.71 | 0.53 | 1.17 |
| 2.4 | -0.74 | 0.54 | 1.13 | -0.75 | 0.48 | 1.17 |
| 2.5 | -0.77 | 0.51 | 1.12 | -0.78 | 0.44 | 1.13 |
| 2.6 | -0.80 | 0.51 | 1.09 | -0.82 | 0.44 | 1.13 |
| 2.7 | -0.83 | 0.52 | 1.06 | -0.84 | 0.43 | 1.09 |
| 2.8 | -0.86 | 0.52 | 1.03 | -0.86 | 0.43 | 1.07 |
| 2.9 | -0.88 | 0.52 | 1.01 | -0.89 | 0.43 | 1.02 |
| 3 | -0.91 | 0.52 | 0.98 | -0.90 | 0.45 | 1.00 |
| 3.1 | -0.91 | 0.54 | 0.97 | -0.92 | 0.44 | 0.99 |
| 3.2 | -0.92 | 0.56 | 0.95 | -0.93 | 0.45 | 0.99 |
| 3.3 | -0.92 | 0.57 | 0.94 | -0.94 | 0.45 | 0.99 |
| 3.4 | -0.92 | 0.59 | 0.93 | -0.95 | 0.45 | 0.98 |
| 3.5 | -0.92 | 0.60 | 0.92 | -0.96 | 0.46 | 0.97 |
| 3.6 | -0.92 | 0.62 | 0.91 | -0.97 | 0.47 | 0.94 |
| 3.7 | -0.93 | 0.63 | 0.90 | -0.97 | 0.47 | 0.93 |
| 3.8 | -0.93 | 0.64 | 0.89 | -0.99 | 0.48 | 0.92 |
| 3.9 | -0.93 | 0.66 | 0.88 | -0.99 | 0.49 | 0.90 |
| 4 | -0.93 | 0.67 | 0.87 | -0.98 | 0.50 | 0.88 |
| 4.1 | -0.93 | 0.69 | 0.85 | -0.98 | 0.49 | 0.85 |
| 4.2 | -0.92 | 0.70 | 0.83 | -0.96 | 0.52 | 0.83 |
| 4.3 | -0.91 | 0.72 | 0.82 | -0.96 | 0.54 | 0.83 |
| 4.4 | -0.91 | 0.74 | 0.80 | -0.96 | 0.55 | 0.82 |
| 4.5 | -0.90 | 0.76 | 0.79 | -0.95 | 0.56 | 0.81 |
| 4.6 | -0.89 | 0.77 | 0.77 | -0.95 | 0.58 | 0.80 |
| 4.7 | -0.89 | 0.79 | 0.76 | -0.95 | 0.58 | 0.81 |
| 4.8 | -0.88 | 0.81 | 0.74 | -0.96 | 0.60 | 0.81 |
| 4.9 | -0.87 | 0.82 | 0.73 | -0.95 | 0.61 | 0.81 |
| 5 | -0.87 | 0.84 | 0.71 | -0.93 | 0.63 | 0.80 |

**Tabla J. 20** Resultados de la desviación estándar de residuales y del estimador LH para eventos del Nido de Bucaramanga

| Te, [s] | Std. Residuales | | | LH | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Zhao | Abrahamson | Montalva | Zhao | Abrahamson | Montalva |
| 0 | 1.41 | 1.72 | 1.52 | 0.38 | 0.08 | 0.09 |
| 0.1 | 1.41 | 2.04 | 1.66 | 0.42 | 0.04 | 0.13 |
| 0.2 | 1.30 | 1.79 | 1.50 | 0.44 | 0.07 | 0.10 |
| 0.3 | 1.36 | 1.64 | 1.46 | 0.37 | 0.08 | 0.07 |
| 0.4 | 1.39 | 1.54 | 1.36 | 0.36 | 0.10 | 0.07 |
| 0.5 | 1.47 | 1.54 | 1.38 | 0.32 | 0.11 | 0.06 |
| 0.6 | 1.46 | 1.55 | 1.36 | 0.33 | 0.13 | 0.05 |
| 0.7 | 1.41 | 1.55 | 1.30 | 0.36 | 0.13 | 0.06 |
| 0.8 | 1.35 | 1.53 | 1.23 | 0.36 | 0.13 | 0.06 |
| 0.9 | 1.34 | 1.54 | 1.20 | 0.36 | 0.15 | 0.07 |
| 1 | 1.34 | 1.56 | 1.19 | 0.36 | 0.15 | 0.07 |
| 1.1 | 1.34 | 1.55 | 1.18 | 0.37 | 0.18 | 0.08 |
| 1.2 | 1.36 | 1.57 | 1.18 | 0.37 | 0.20 | 0.09 |
| 1.3 | 1.37 | 1.57 | 1.19 | 0.37 | 0.20 | 0.11 |
| 1.4 | 1.30 | 1.53 | 1.13 | 0.39 | 0.22 | 0.13 |
| 1.5 | 1.26 | 1.50 | 1.09 | 0.41 | 0.24 | 0.14 |
| 1.6 | 1.23 | 1.47 | 1.07 | 0.41 | 0.28 | 0.16 |
| 1.7 | 1.21 | 1.46 | 1.06 | 0.41 | 0.29 | 0.18 |
| 1.8 | 1.19 | 1.44 | 1.06 | 0.42 | 0.30 | 0.20 |
| 1.9 | 1.17 | 1.43 | 1.05 | 0.41 | 0.32 | 0.21 |
| 2 | 1.16 | 1.43 | 1.06 | 0.41 | 0.33 | 0.22 |
| 2.1 | 1.16 | 1.42 | 1.05 | 0.40 | 0.34 | 0.23 |
| 2.2 | 1.16 | 1.41 | 1.06 | 0.39 | 0.35 | 0.24 |
| 2.3 | 1.16 | 1.40 | 1.06 | 0.36 | 0.37 | 0.23 |
| 2.4 | 1.17 | 1.40 | 1.07 | 0.35 | 0.37 | 0.23 |
| 2.5 | 1.17 | 1.40 | 1.09 | 0.34 | 0.36 | 0.24 |
| 2.6 | 1.18 | 1.40 | 1.09 | 0.33 | 0.36 | 0.25 |
| 2.7 | 1.18 | 1.39 | 1.10 | 0.33 | 0.37 | 0.25 |
| 2.8 | 1.19 | 1.39 | 1.11 | 0.32 | 0.38 | 0.26 |
| 2.9 | 1.20 | 1.38 | 1.12 | 0.30 | 0.39 | 0.27 |
| 3 | 1.21 | 1.38 | 1.14 | 0.29 | 0.39 | 0.27 |
| 3.1 | 1.21 | 1.38 | 1.14 | 0.29 | 0.38 | 0.28 |
| 3.2 | 1.21 | 1.37 | 1.14 | 0.29 | 0.39 | 0.29 |
| 3.3 | 1.22 | 1.37 | 1.15 | 0.29 | 0.38 | 0.30 |
| 3.4 | 1.22 | 1.37 | 1.15 | 0.28 | 0.38 | 0.29 |
| 3.5 | 1.22 | 1.37 | 1.16 | 0.28 | 0.38 | 0.29 |
| 3.6 | 1.23 | 1.37 | 1.16 | 0.28 | 0.38 | 0.30 |
| 3.7 | 1.23 | 1.37 | 1.17 | 0.28 | 0.39 | 0.30 |
| 3.8 | 1.24 | 1.37 | 1.18 | 0.28 | 0.39 | 0.32 |
| 3.9 | 1.24 | 1.37 | 1.19 | 0.28 | 0.38 | 0.31 |
| 4 | 1.25 | 1.37 | 1.19 | 0.27 | 0.38 | 0.32 |
| 4.1 | 1.25 | 1.37 | 1.20 | 0.27 | 0.39 | 0.31 |
| 4.2 | 1.25 | 1.37 | 1.22 | 0.27 | 0.39 | 0.32 |
| 4.3 | 1.25 | 1.36 | 1.23 | 0.27 | 0.39 | 0.31 |
| 4.4 | 1.25 | 1.36 | 1.24 | 0.26 | 0.40 | 0.31 |
| 4.5 | 1.25 | 1.36 | 1.26 | 0.26 | 0.40 | 0.31 |
| 4.6 | 1.25 | 1.36 | 1.27 | 0.26 | 0.39 | 0.30 |
| 4.7 | 1.25 | 1.36 | 1.29 | 0.27 | 0.39 | 0.30 |
| 4.8 | 1.26 | 1.36 | 1.30 | 0.28 | 0.39 | 0.30 |
| 4.9 | 1.26 | 1.37 | 1.32 | 0.27 | 0.39 | 0.30 |
| 5 | 1.26 | 1.37 | 1.33 | 0.28 | 0.39 | 0.30 |



K

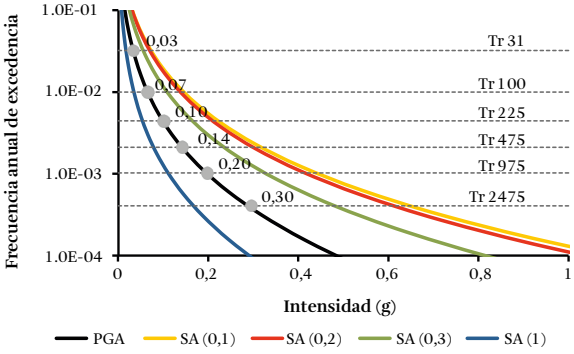
# Resultados de amenaza sísmica para las capitales departamentales

En este anexo se presenta para cada una de las ciudades capitales de Colombia, los diferentes resultados que se pueden derivar del Modelo Nacional de Amenaza Sísmica desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano. Los resultados se presentan en una ficha por ciudad capital que incluye los descritos a continuación:

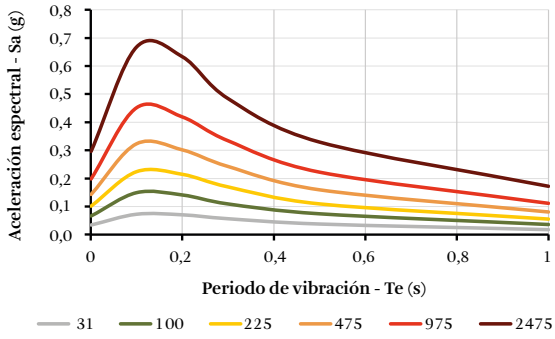
- **Espectros de Amenaza Uniforme (*Uniform Hazard Spectra*):** presenta el valor medio (es posible obtener los valores para otros percentiles) de aceleración espectral respecto del periodo de vibración estructural (ordenada espectral) y para diferentes periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años (que corresponden a una probabilidad de excedencia de 10%, 5% y 2% en 50 años respectivamente), entre otros.
- **Curvas de Amenaza (*Uniform Hazard Curve*):** representa valor medio (es posible obtener los valores para otros percentiles) de la probabilidad (o frecuencia) de excedencia respecto del nivel de intensidad y para múltiples ordenadas espectrales como PGA, Sa (0.1s) , Sa (0.3s), entre otros.
- **Participación de magnitud:** presenta como su nombre lo indica, la participación porcentual que tienen los eventos sísmicos respecto de su magnitud, en la amenaza sísmica estimada para una ordenada espectral definida.
- **Participación de distancia:** de manera similar al anterior, presenta la participación porcentual que tienen los eventos sísmicos respecto de su distancia al punto de análisis, en la amenaza sísmica estimada.
- **Participación magnitud-distancia:** mapea la participación relativa de los pares magnitud-distancia en la amenaza sísmica estimada para el sitio de análisis. Esta representación se realiza para una única ordenada espectral.
- **Participación por ambiente tectónico:** presenta la participación porcentual que tiene cada uno de los ambientes tectónicos en la amenaza sísmica estimada, respecto de diferentes ordenadas espectrales.

| | |
|---|---|
| **Departamento: Antioquia** | **Longitud: -75.57600171** |
| **Municipio: Medellín** | **Latitud: 6.248586** |
| **Centro poblado: Medellín** | **Período de retorno: 475 años** |

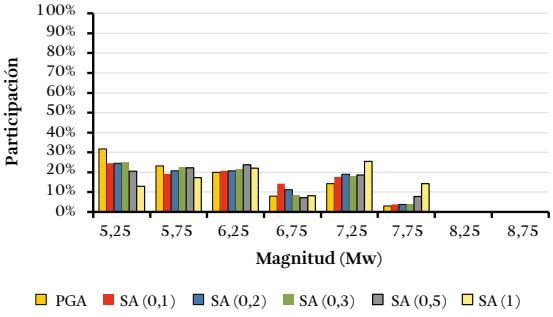
**Curvas de amenaza uniforme**



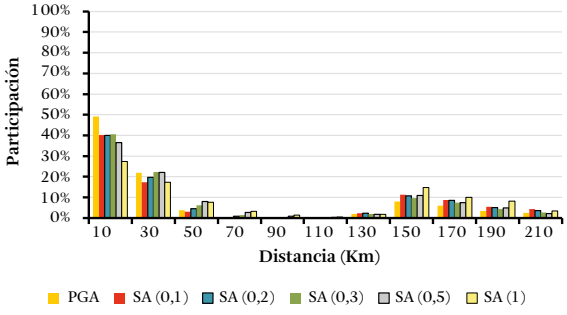

**Espectros de amenaza uniforme**



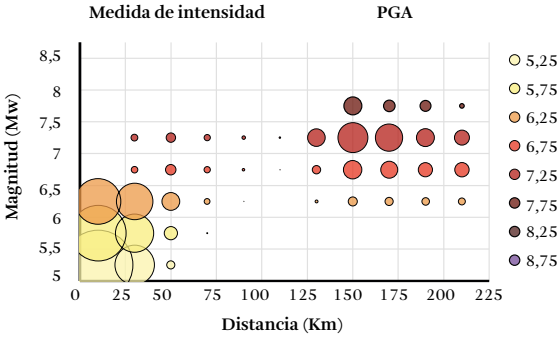

**Participación según magnitud**



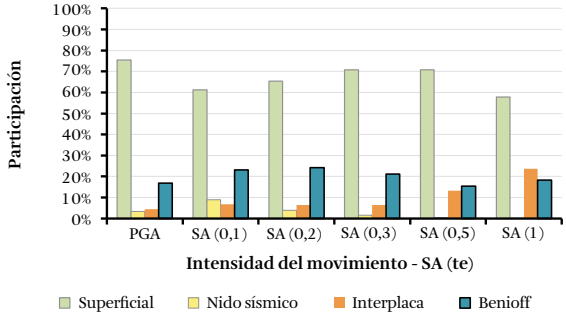

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

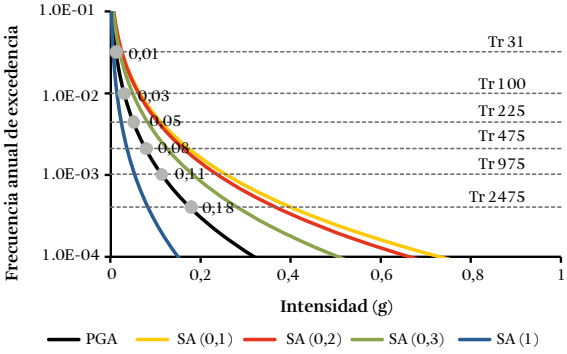



**Participación según ambiente tectónico**

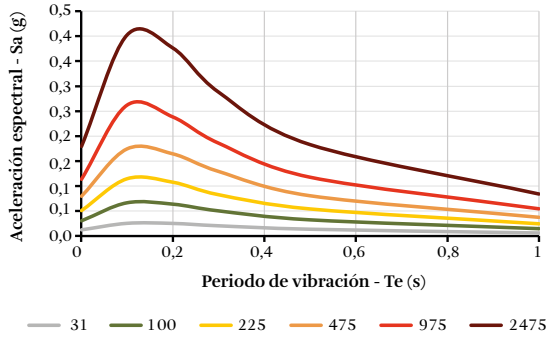


| | |
|---|---|
| Departamento: Atlántico | Longitud: -74.81321697 |
| Municipio: Barranquilla | Latitud: 10.978320 |
| Centro poblado: Barranquilla | Período de retorno: 475 años |

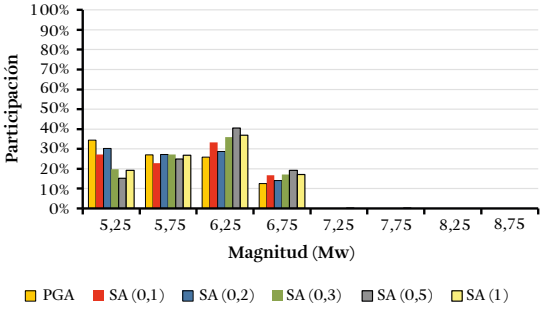
Curvas de amenaza uniforme



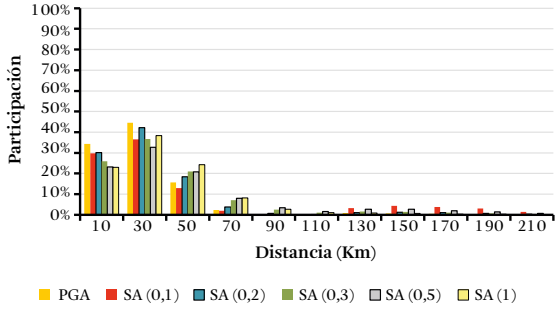

Espectros de amenaza uniforme



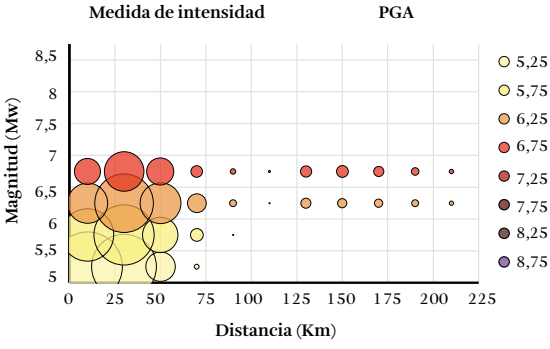

Participación según magnitud



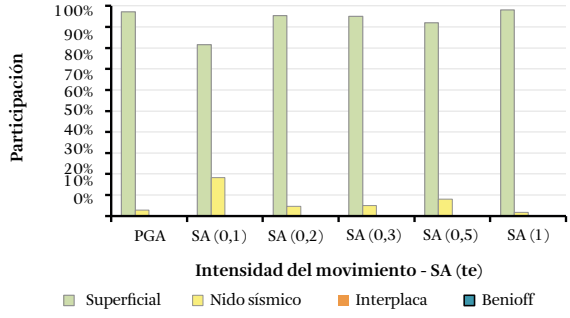

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

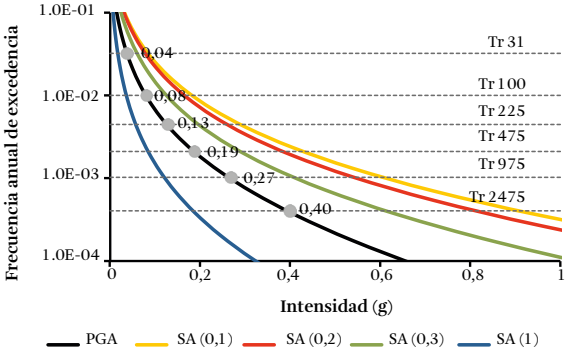



Participación según ambiente tectónico

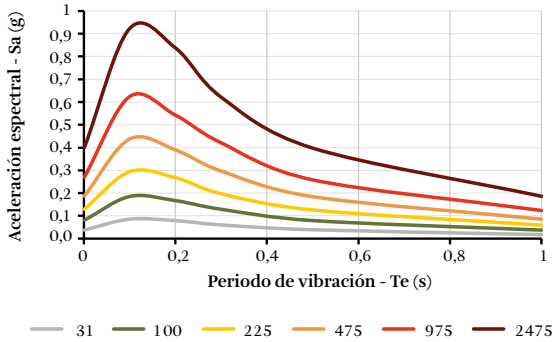


| | |
|---|---|
| **Departamento: Bogotá** | **Longitud: -74.10671532** |
| **Municipio: Bogotá** | **Latitud: 4.649937** |
| **Centro poblado: Bogotá** | **Período de retorno: 475 años** |

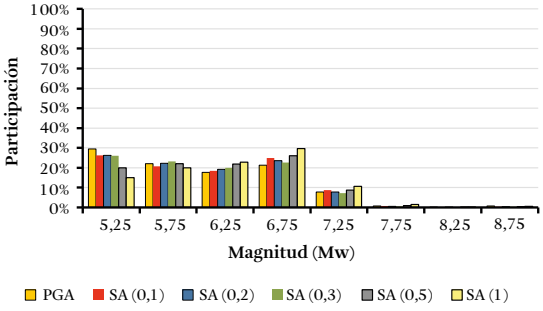
**Curvas de amenaza uniforme**



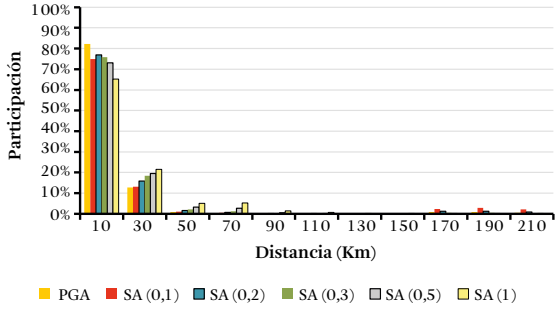

**Espectros de amenaza uniforme**



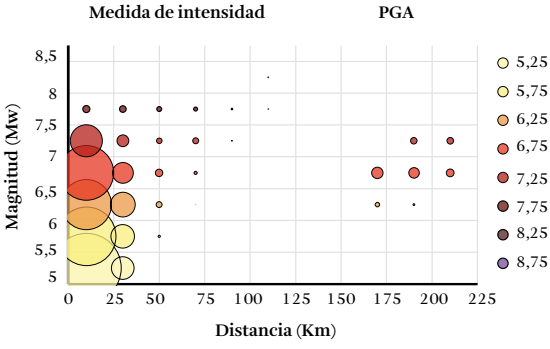

**Participación según magnitud**



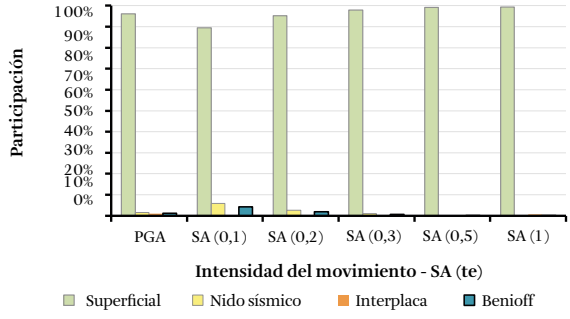

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

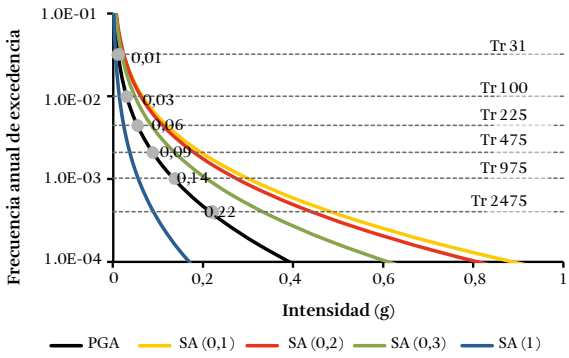



**Participación según ambiente tectónico**

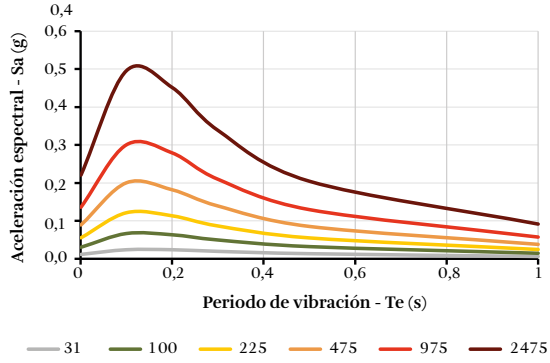


| | |
|---|---|
| Departamento: Bolívar | Longitud: -74.49642648 |
| Municipio: Cartagena | Latitud: 10.384988 |
| Centro poblado: Cartagena | Período de retorno: 475 años |

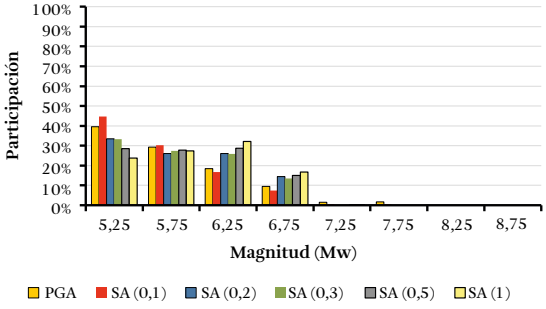
Curvas de amenaza uniforme



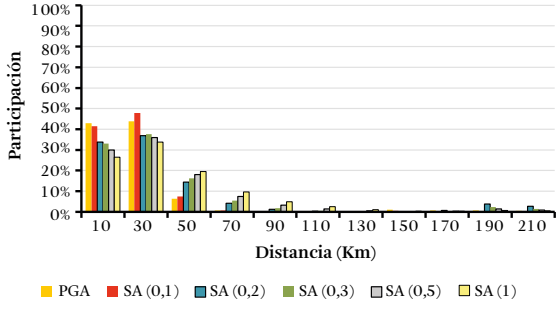

Espectros de amenaza uniforme



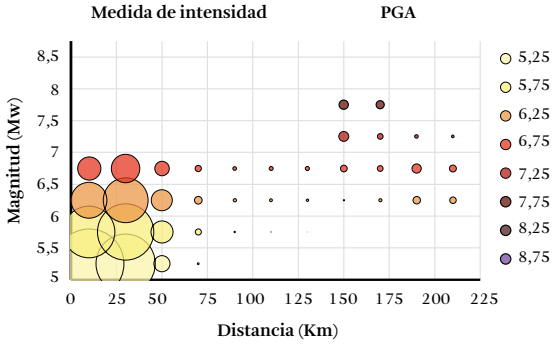

Participación según magnitud



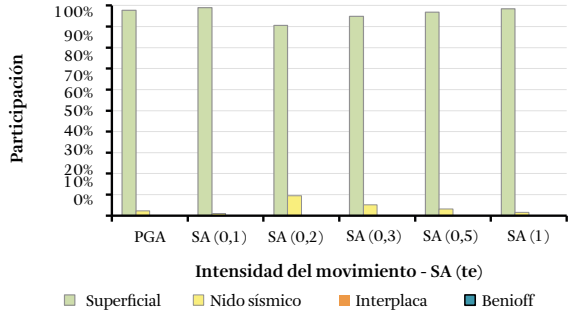

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

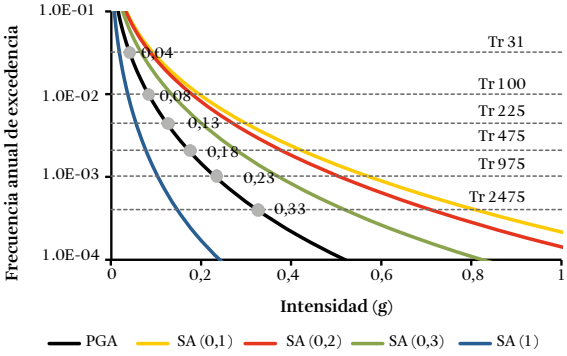



Participación según ambiente tectónico

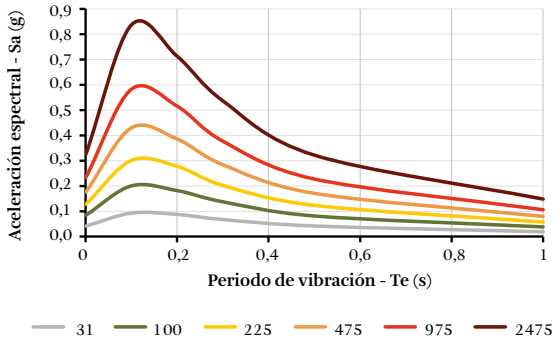


| | |
|---|---|
| **Departamento: Boyacá** | **Longitud: -73.35548966** |
| **Municipio: Tunja** | **Latitud: 5.539952** |
| **Centro poblado: Tunja** | **Período de retorno: 475 años** |

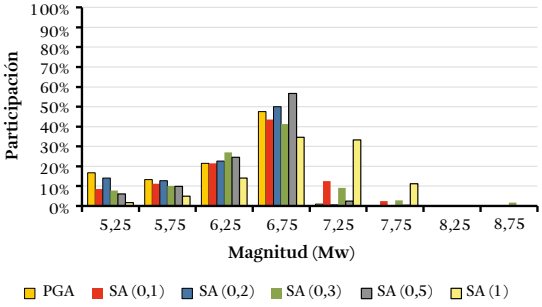
**Curvas de amenaza uniforme**



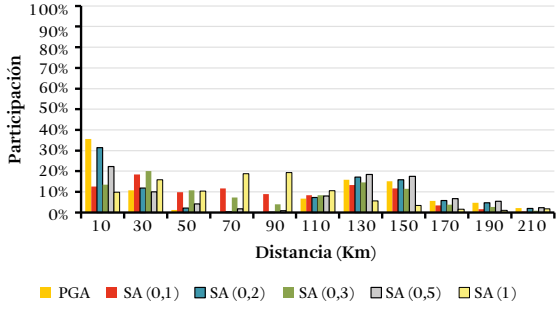

**Espectros de amenaza uniforme**



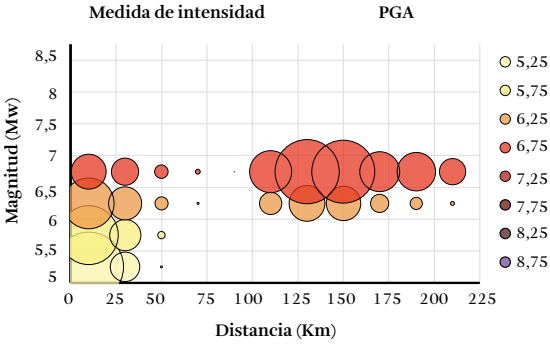

**Participación según magnitud**



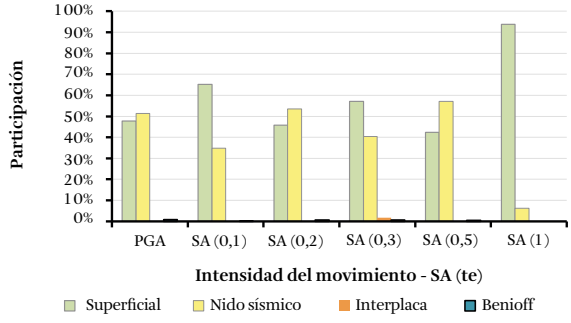

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

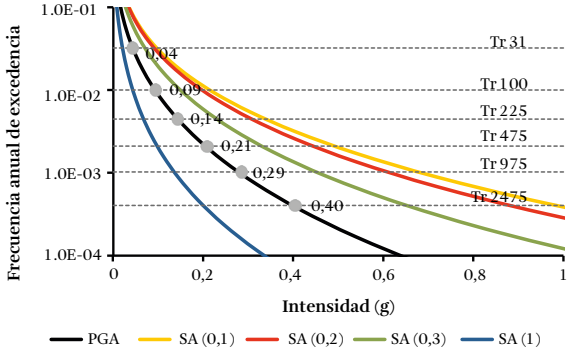



**Participación según ambiente tectónico**

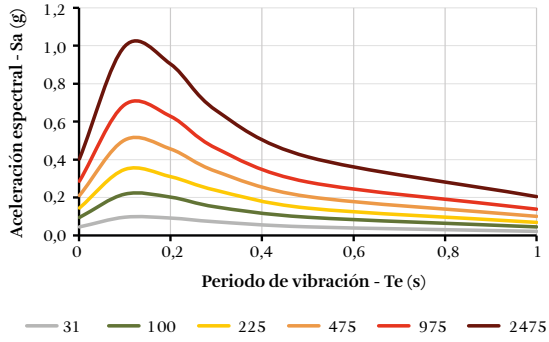


| | |
|---|---|
| Departamento: Caldas | Longitud: -75.49105671 |
| Municipio: Manizales | Latitud: 5.057687 |
| Centro poblado: Manizales | Período de retorno: 475 años |

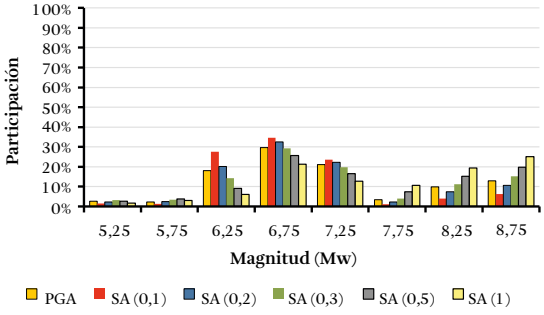
Curvas de amenaza uniforme



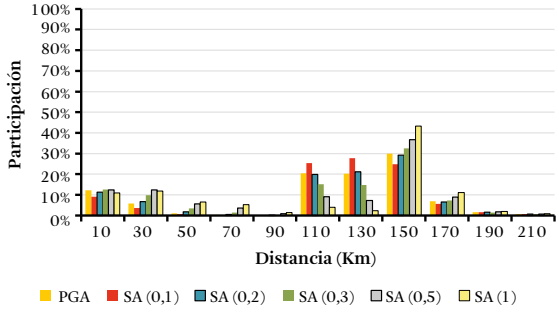

Espectros de amenaza uniforme



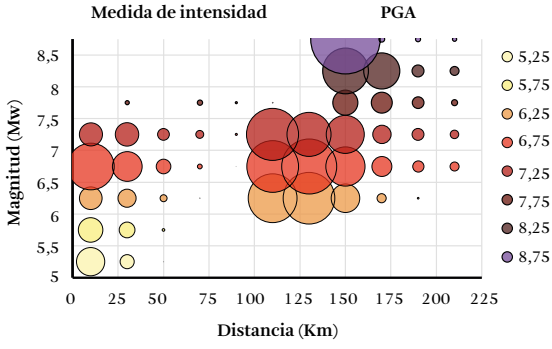

Participación según magnitud



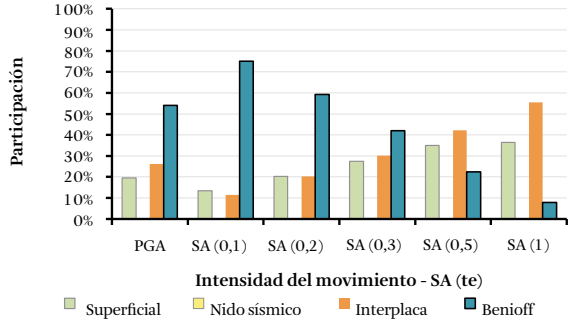

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

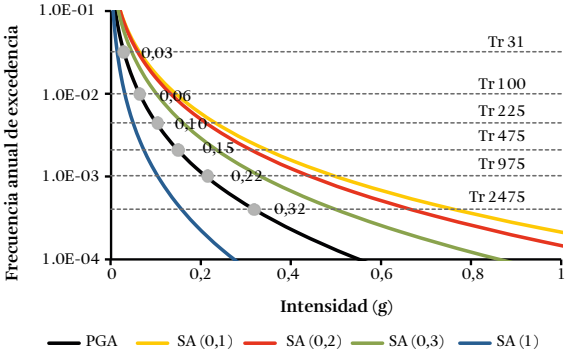



Participación según ambiente tectónico

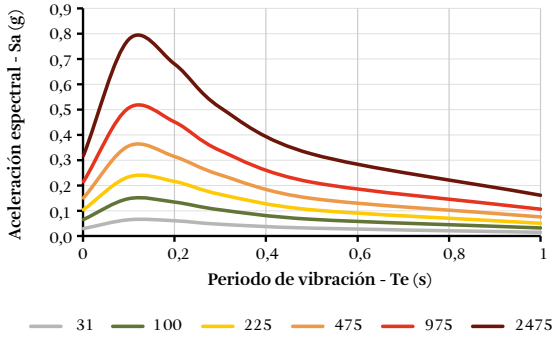


| | |
|---|---|
| **Departamento: Caquetá** | **Longitud: -75.60855974** |
| **Municipio: Florencia** | **Latitud: 1.617924** |
| **Centro poblado: Florencia** | **Período de retorno: 475 años** |

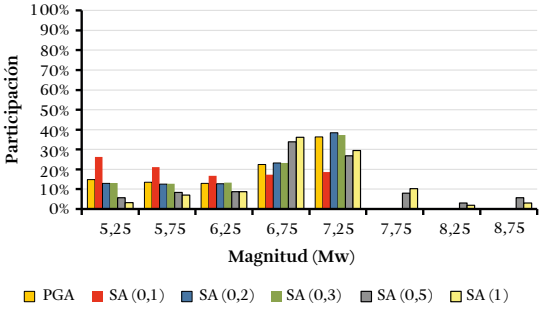
**Curvas de amenaza uniforme**



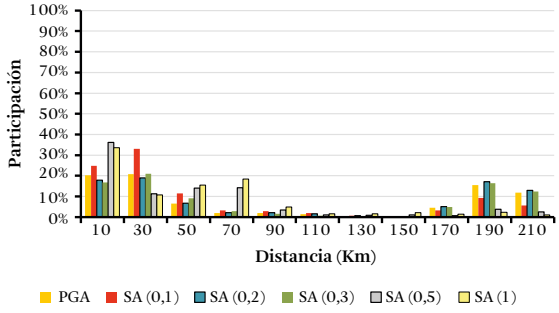

**Espectros de amenaza uniforme**



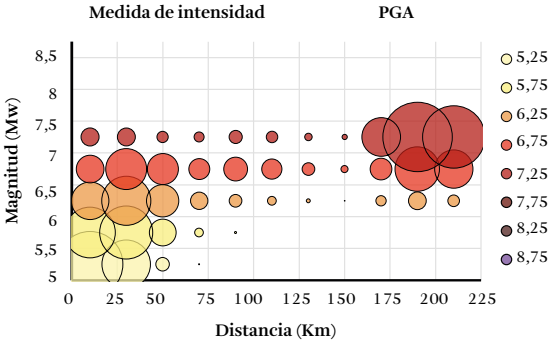

**Participación según magnitud**



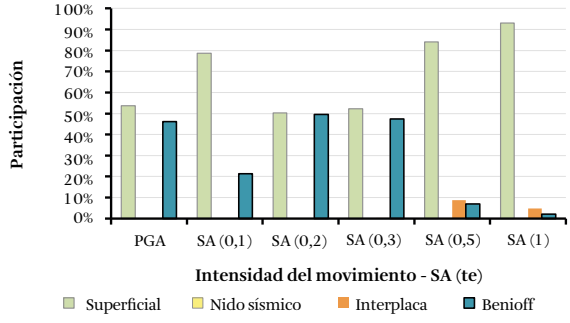

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

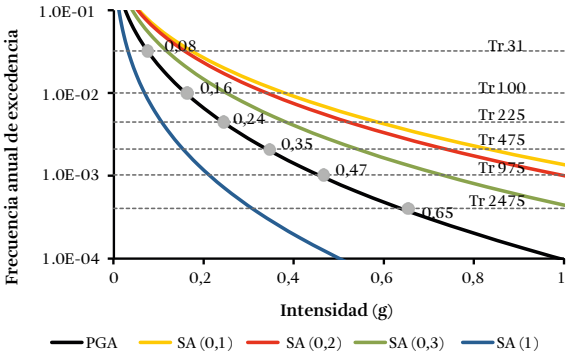



**Participación según ambiente tectónico**

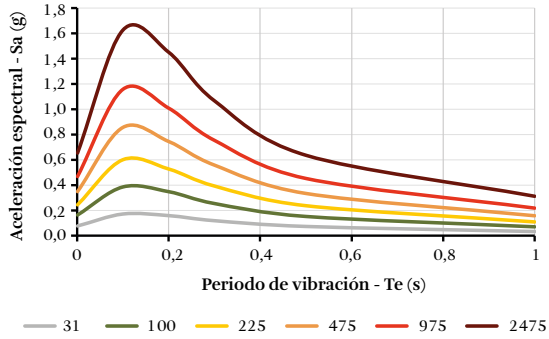


| | |
|---|---|
| Departamento: Cauca | Longitud: -76.59889237 |
| Municipio: Popayán | Latitud: 2.459949 |
| Centro poblado: Popayán | Período de retorno: 475 años |

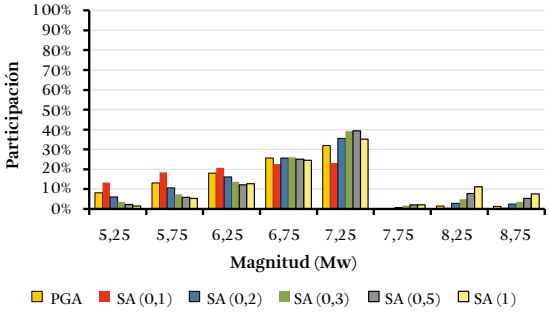
Curvas de amenaza uniforme



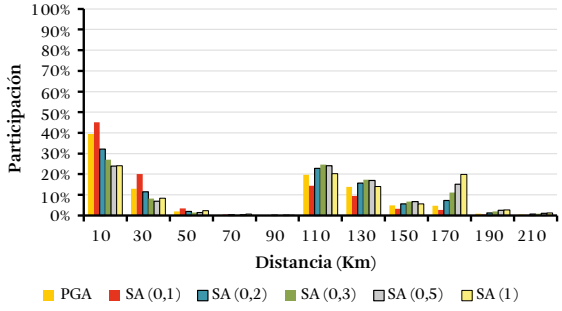

Espectros de amenaza uniforme



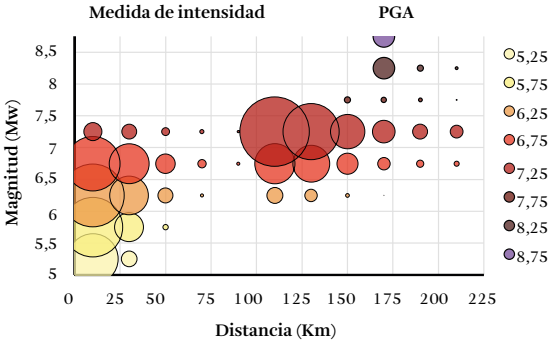

Participación según magnitud



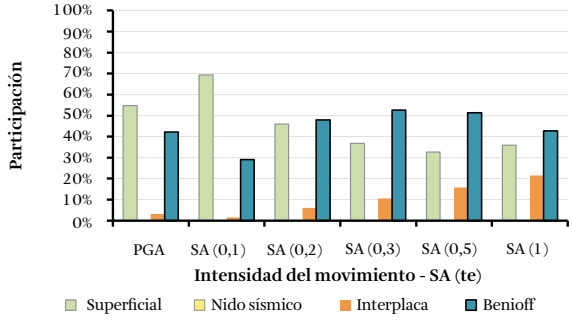

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

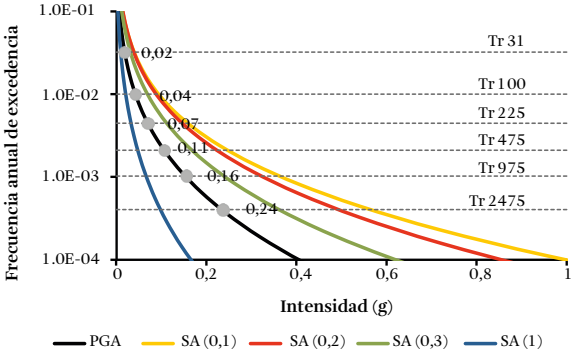



Participación según ambiente tectónico

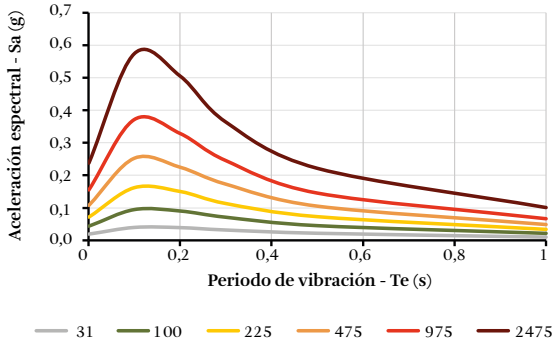


| | |
|---|---|
| **Departamento: Cesar** | **Longitud: -73.25939042** |
| **Municipio: Valledupar** | **Latitud: 10.460481** |
| **Centro poblado: Valledupar** | **Período de retorno: 475 años** |

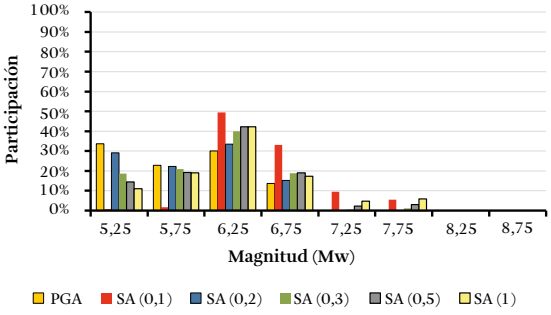
**Curvas de amenaza uniforme**



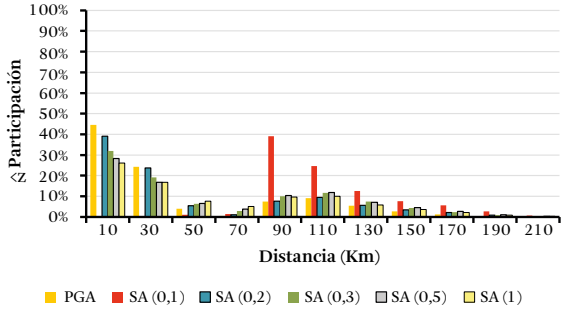

**Espectros de amenaza uniforme**



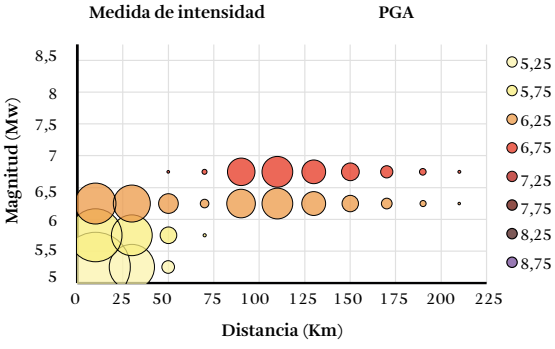

**Participación según magnitud**



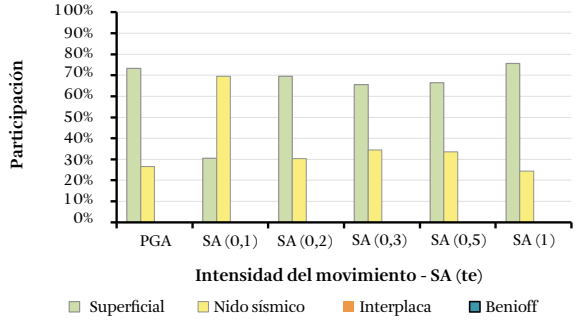

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

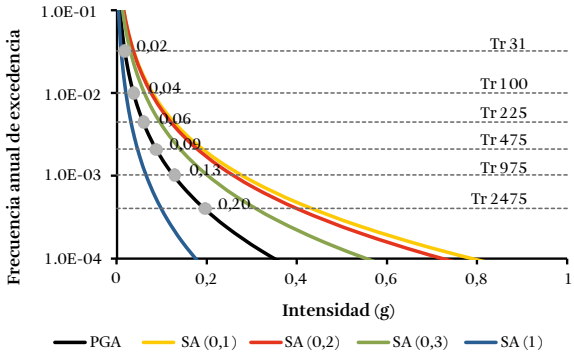



**Participación según ambiente tectónico**

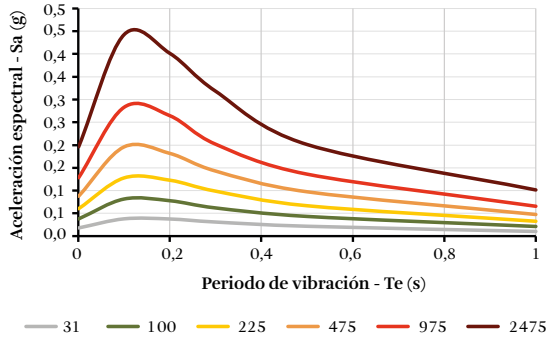


| | |
|---|---|
| Departamento: Córdoba | Longitud: -75.87325731 |
| Municipio: Montería | Latitud: 8.759815 |
| Centro poblado: Montería | Período de retorno: 475 años |

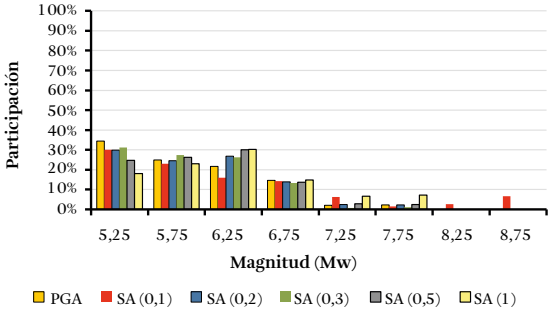
Curvas de amenaza uniforme



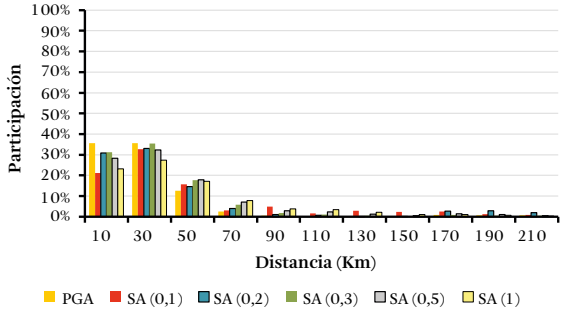

Espectros de amenaza uniforme



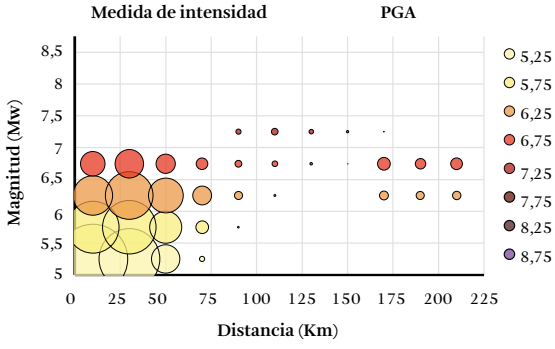

Participación según magnitud



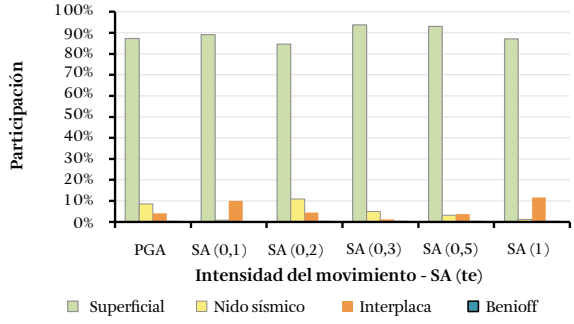

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

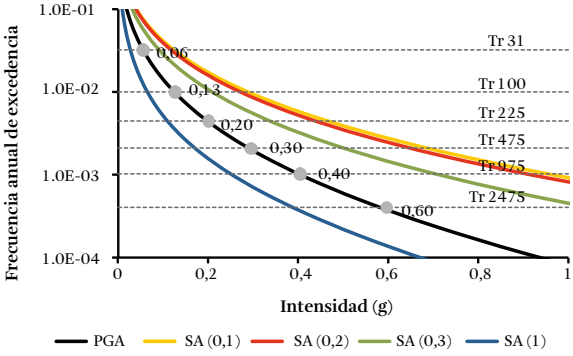



Participación según ambiente tectónico

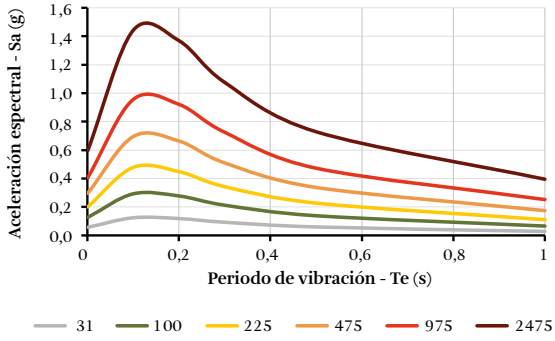


| | |
|---|---|
| **Departamento: Chocó** | **Longitud: -76.6383969** |
| **Municipio: Quibdó** | **Latitud: 5.680996** |
| **Centro poblado: Quibdó** | **Período de retorno: 475 años** |

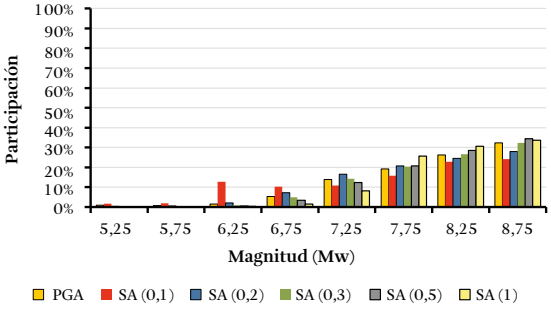
**Curvas de amenaza uniforme**



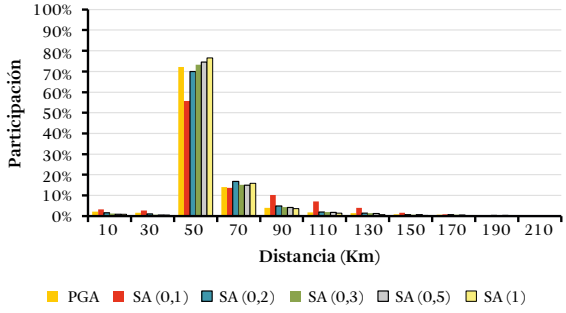

**Espectros de amenaza uniforme**



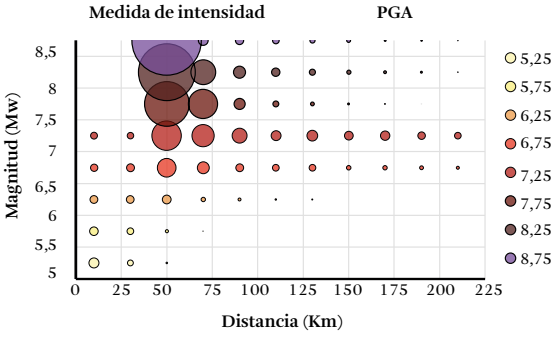

**Participación según magnitud**



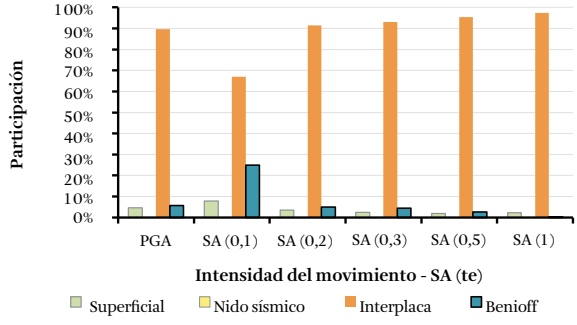

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

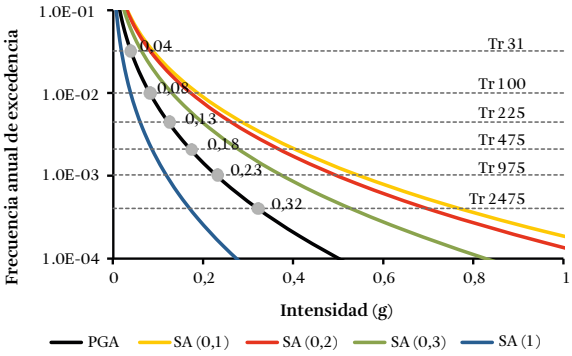



**Participación según ambiente tectónico**

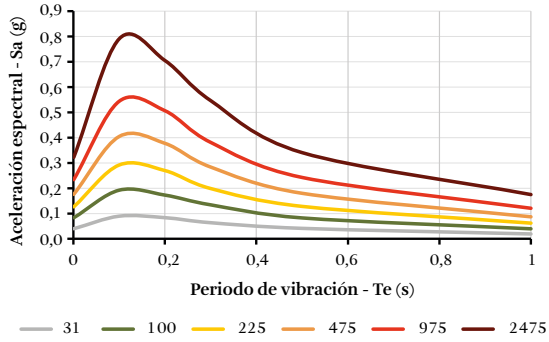


| | |
|---|---|
| Departamento: Huila | Longitud: -75.277773148 |
| Municipio: Neiva | Latitud: 2.935559 |
| Centro poblado: Neiva | Período de retorno: 475 años |

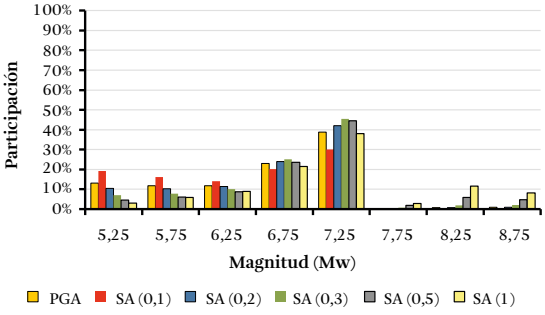
Curvas de amenaza uniforme



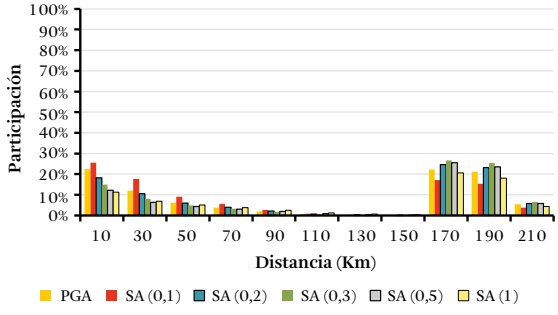

Espectros de amenaza uniforme



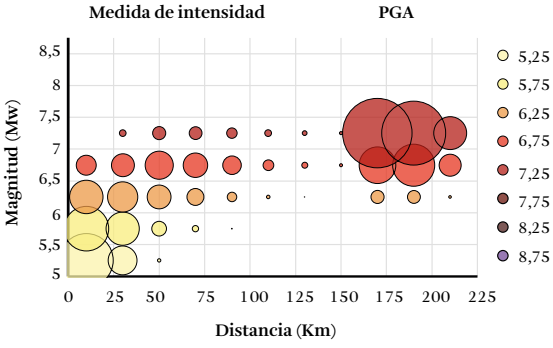

Participación según magnitud



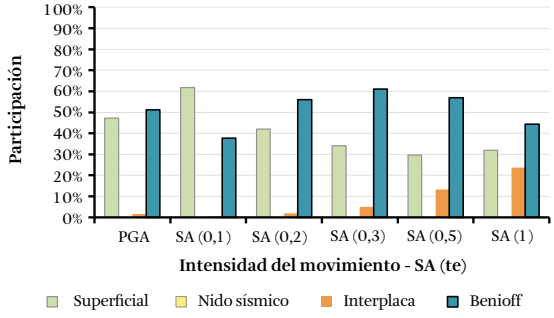

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

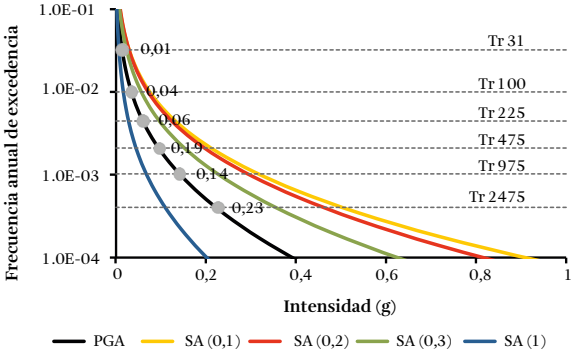



Participación según ambiente tectónico

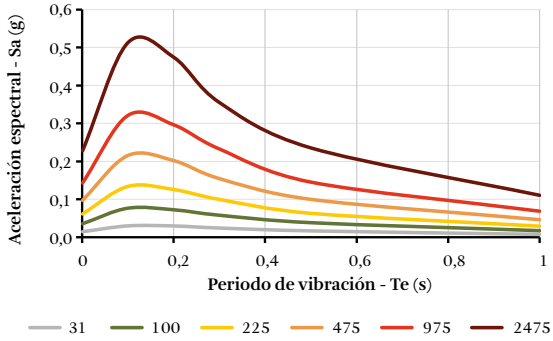


| | |
|---|---|
| **Departamento: Guajira** | **Longitud: -72.91148731** |
| **Municipio: Riohacha** | **Latitud: 11.528750** |
| **Centro poblado: Riohacha** | **Período de retorno: 475 años** |

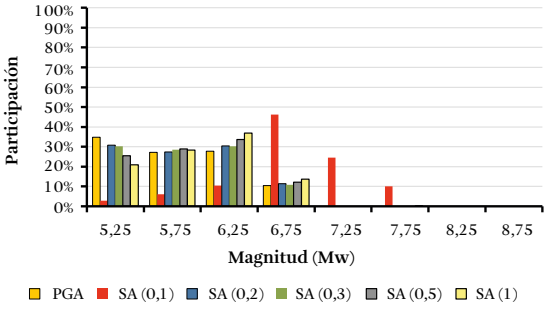
**Curvas de amenaza uniforme**



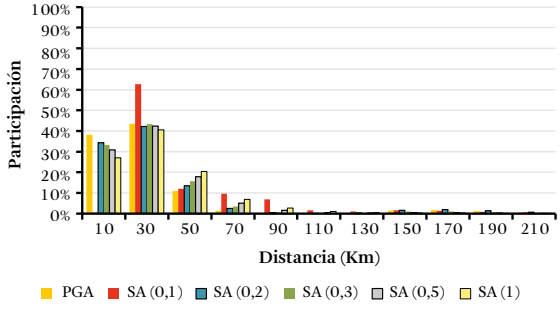

**Espectros de amenaza uniforme**



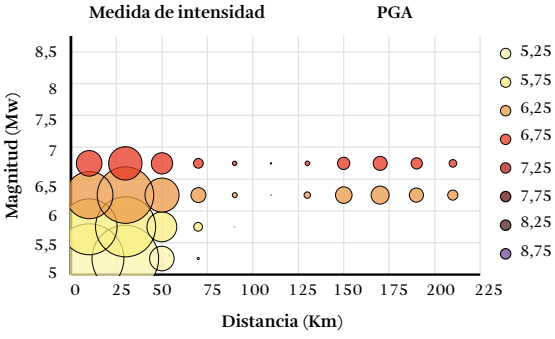

**Participación según magnitud**



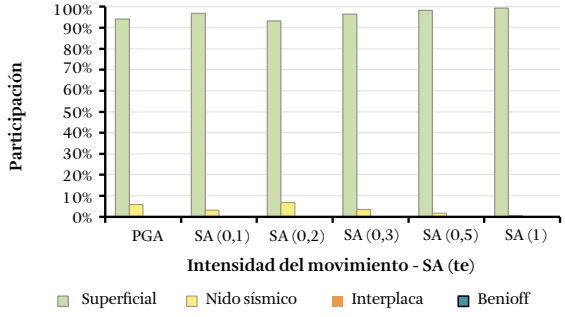

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

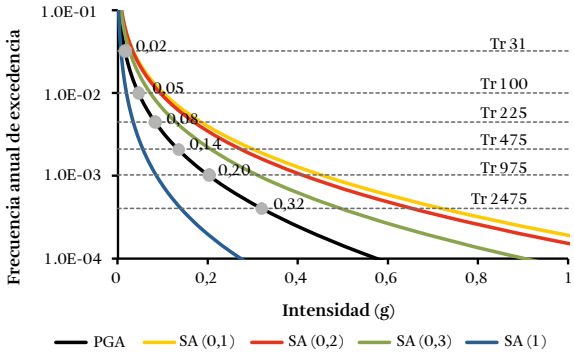



**Participación según ambiente tectónico**

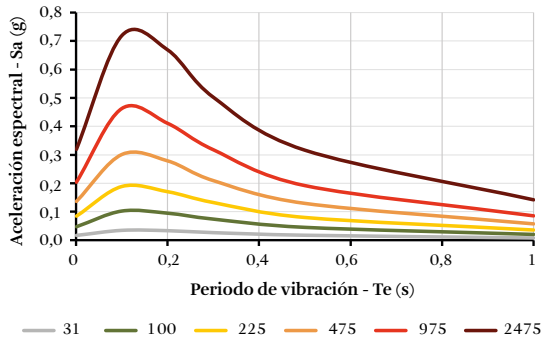


| | |
|---|---|
| Departamento: Magdalena | Longitud: -74.20021099 |
| Municipio: Santa Marta | Latitud: 11.2044773 |
| Centro poblado: Santa Marta | Período de retorno: 475 años |

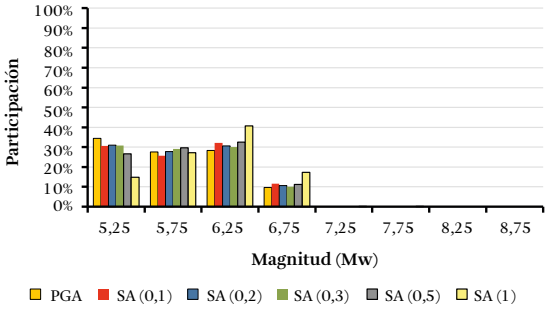
Curvas de amenaza uniforme



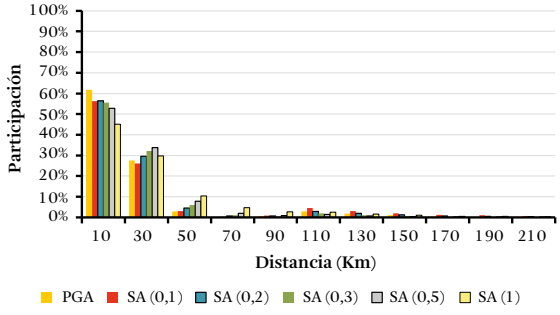

Espectros de amenaza uniforme



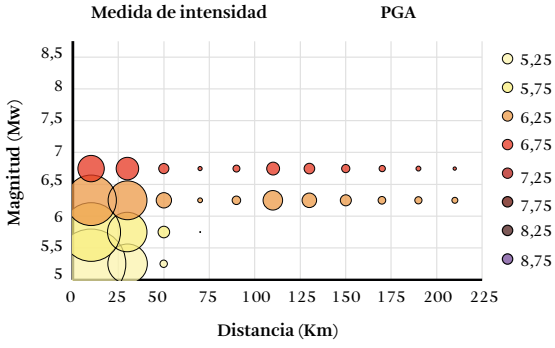

Participación según magnitud



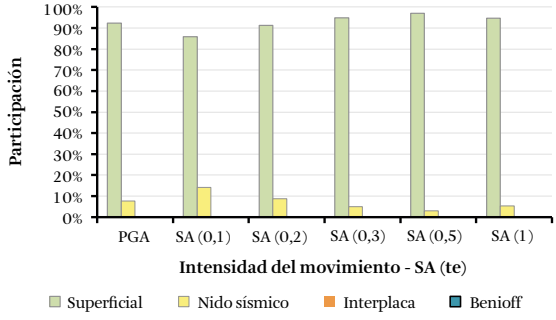

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

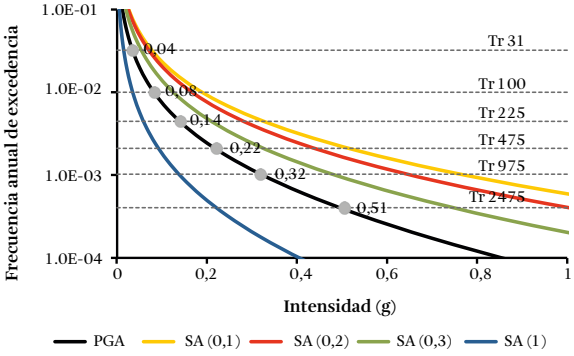



Participación según ambiente tectónico

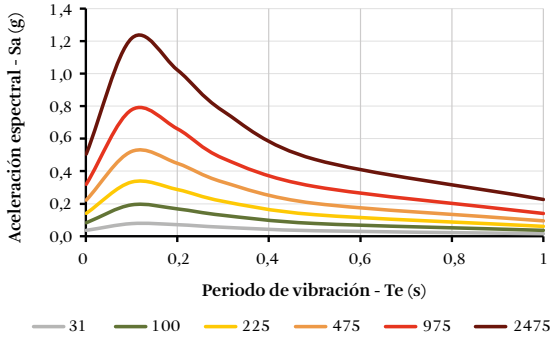


| | |
|---|---|
| **Departamento: Meta** | **Longitud: -73.62456253** |
| **Municipio: Villavicencio** | **Latitud: 4.123859** |
| **Centro poblado: Villavicencio** | **Período de retorno: 475 años** |

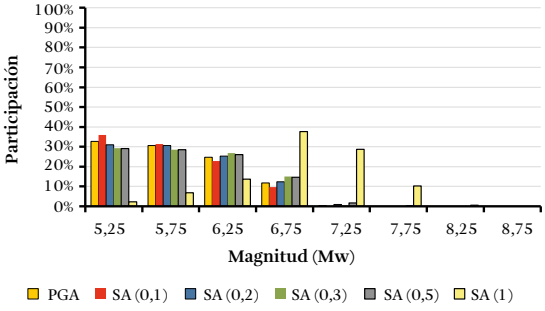
**Curvas de amenaza uniforme**



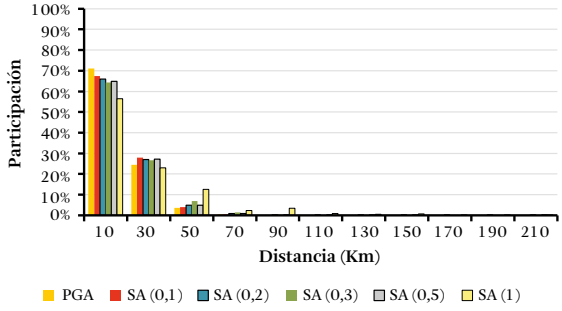

**Espectros de amenaza uniforme**



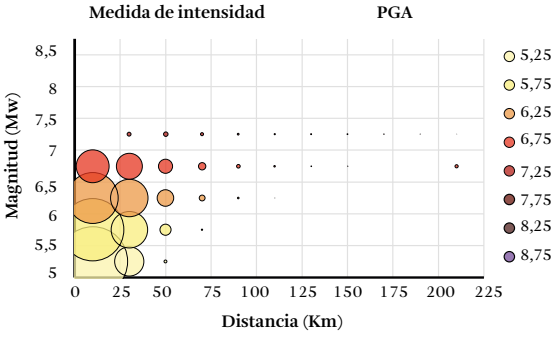

**Participación según magnitud**



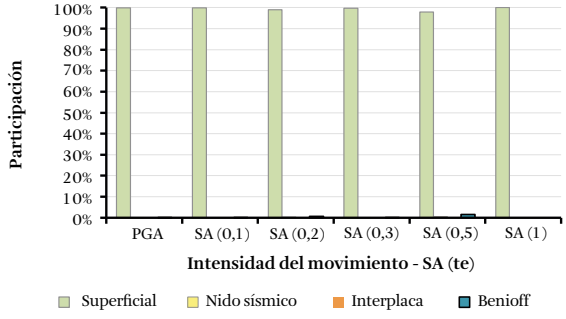

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

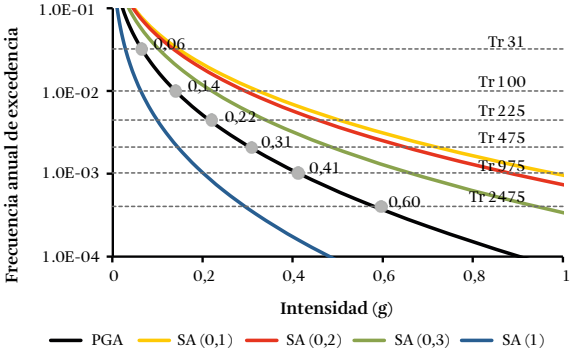



**Participación según ambiente tectónico**

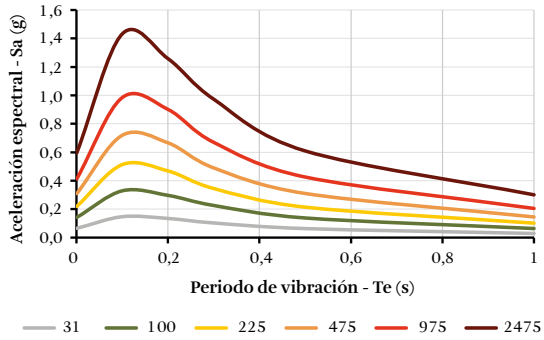


| | |
|---|---|
| Departamento: Nariño | Longitud: -77.27877597 |
| Municipio: Pasto | Latitud: 1.212455 |
| Centro poblado: Pasto | Período de retorno: 475 años |

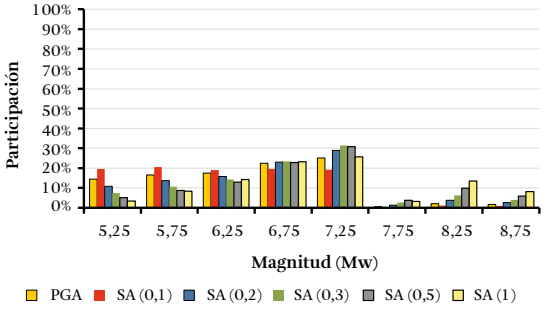
Curvas de amenaza uniforme



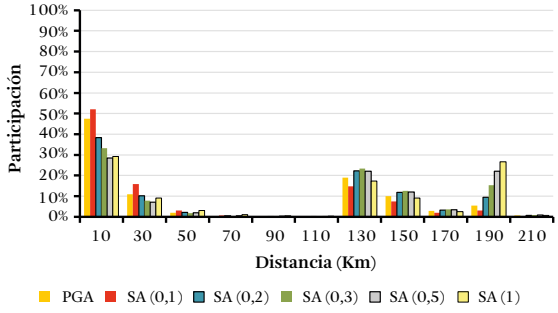

Espectros de amenaza uniforme



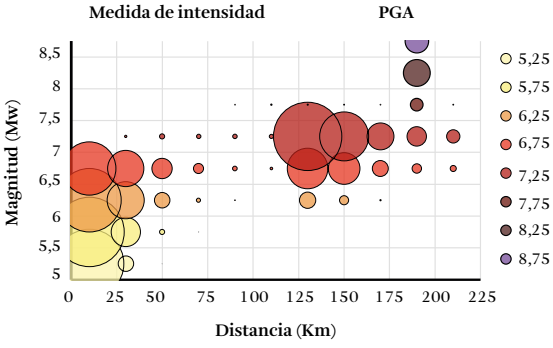

Participación según magnitud



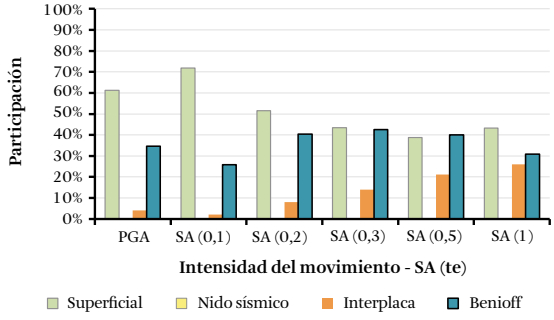

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

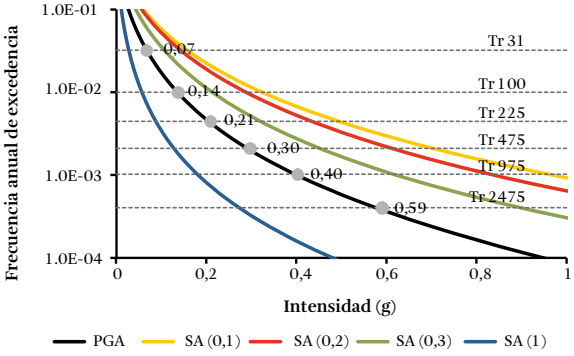



Participación según ambiente tectónico

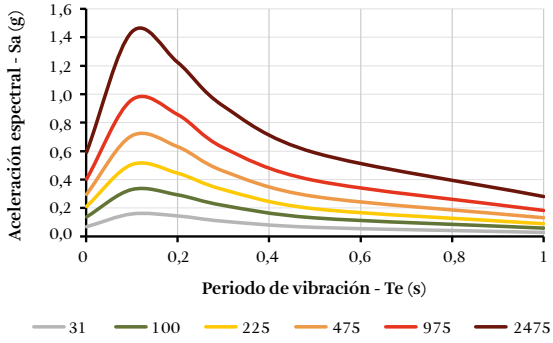


| | |
|---|---|
| **Departamento: Norte de Santander** | **Longitud: -72.50806512** |
| **Municipio: Cúcuta** | **Latitud: 7.905584** |
| **Centro poblado: Cúcuta** | **Período de retorno: 475 años** |

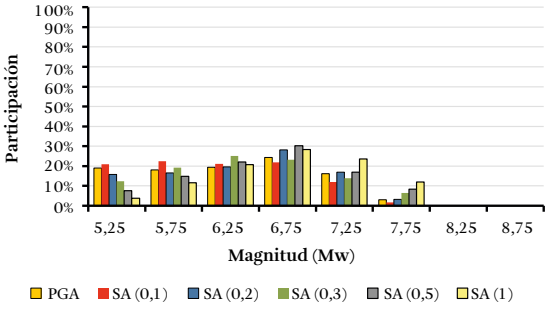
**Curvas de amenaza uniforme**



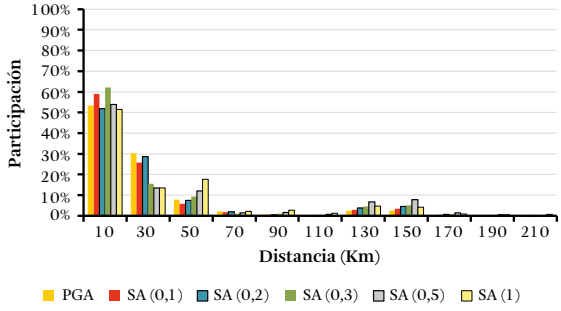

**Espectros de amenaza uniforme**



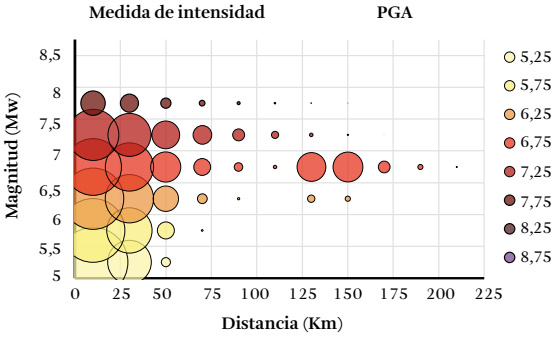

**Participación según magnitud**



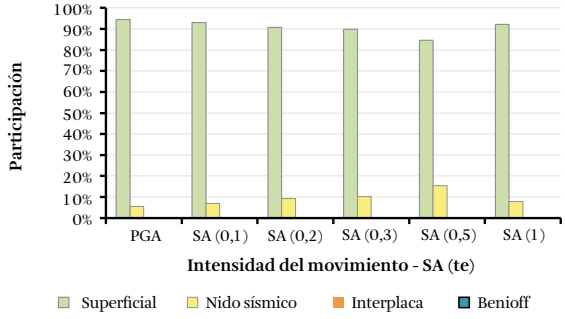

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

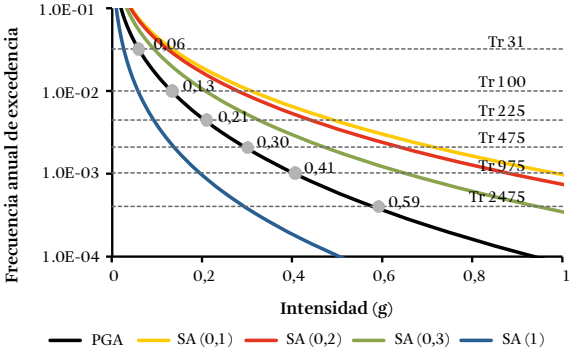



**Participación según ambiente tectónico**

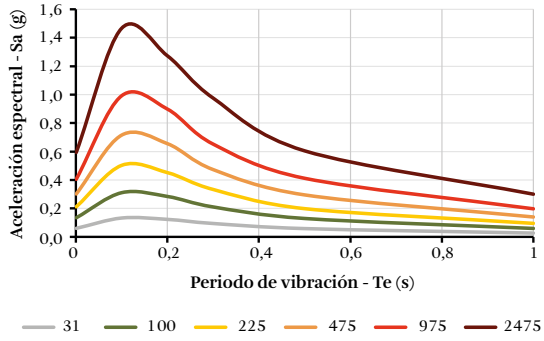


| | |
|---|---|
| Departamento: Quindío | Longitud: -75.68075454 |
| Municipio: Armenia | Latitud: 4.535987 |
| Centro poblado: Armenia | Período de retorno: 475 años |

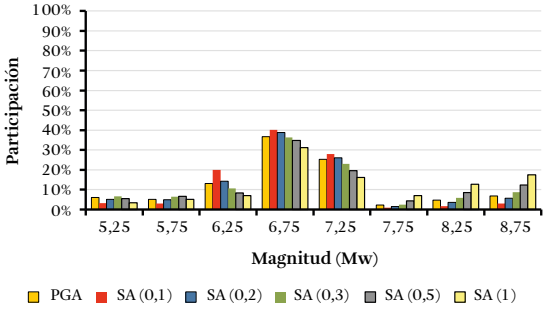
Curvas de amenaza uniforme



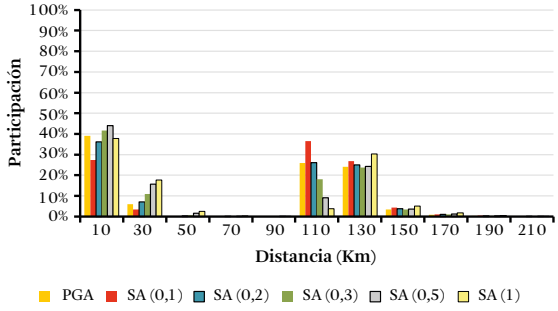

Espectros de amenaza uniforme



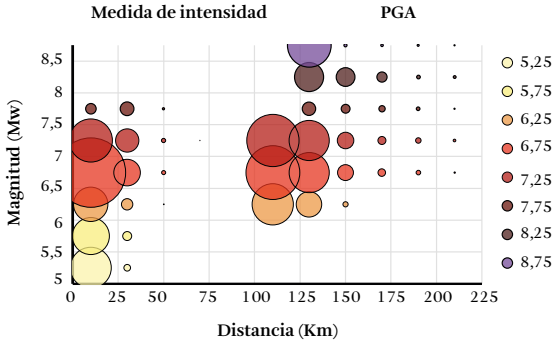

Participación según magnitud



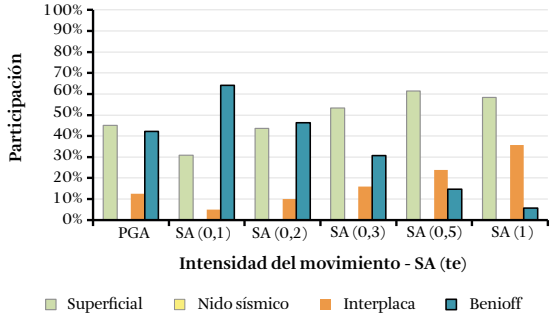

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

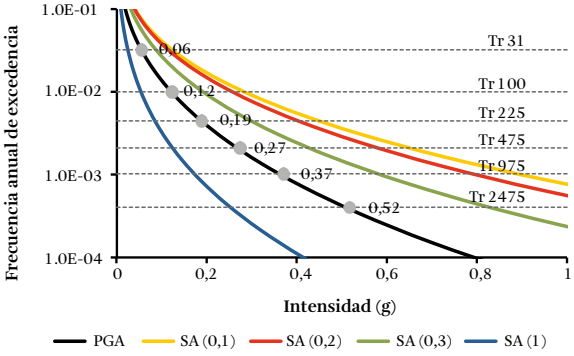



Participación según ambiente tectónico

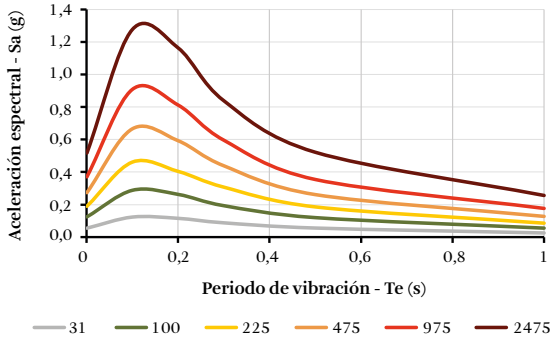


| | |
|---|---|
| **Departamento: Risaralda** | **Longitud: -75.71901523** |
| **Municipio: Pereira** | **Latitud: 4.805323** |
| **Centro poblado: Pereira** | **Período de retorno: 475 años** |

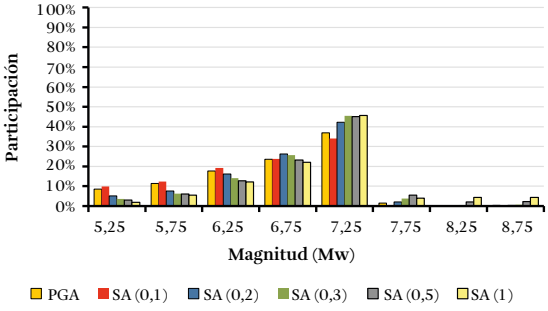
**Curvas de amenaza uniforme**



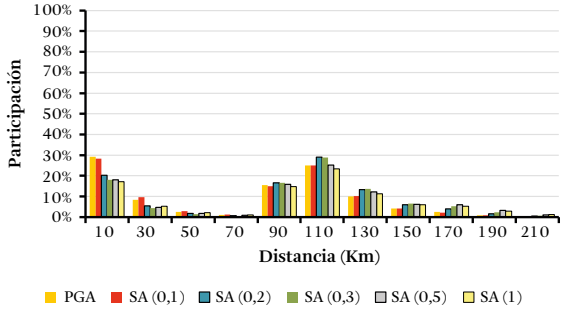

**Espectros de amenaza uniforme**



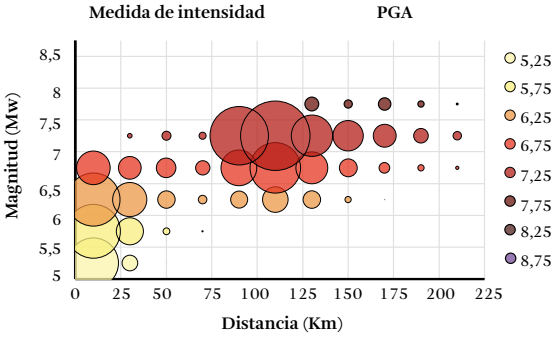

**Participación según magnitud**



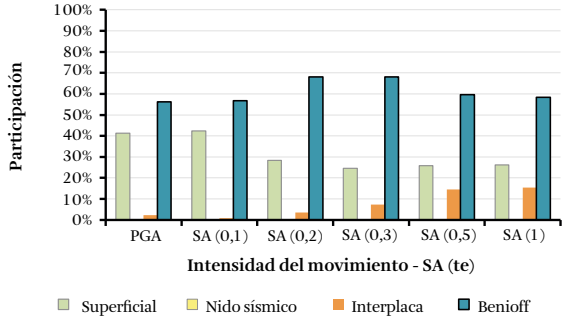

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

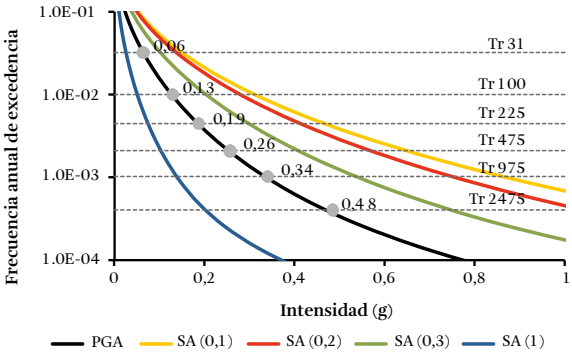



**Participación según ambiente tectónico**

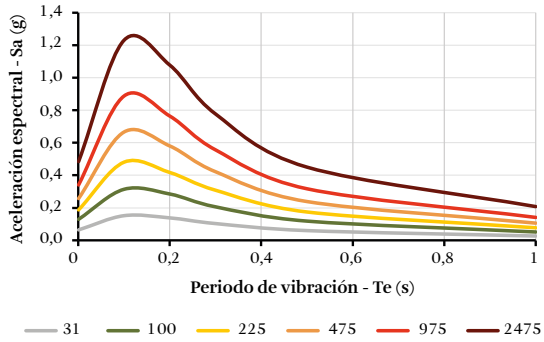


| | |
|---|---|
| **Departamento: Santander** | **Longitud: -73.13259762** |
| **Municipio: Bucaramanga** | **Latitud: 7.116268** |
| **Centro poblado: Bucaramanga** | **Período de retorno: 475 años** |

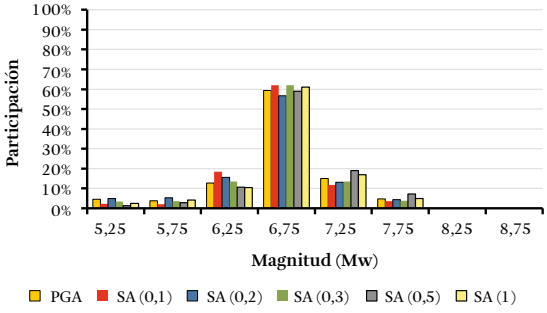
**Curvas de amenaza uniforme**



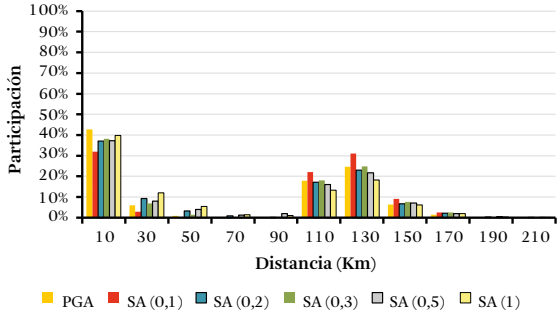

**Espectros de amenaza uniforme**



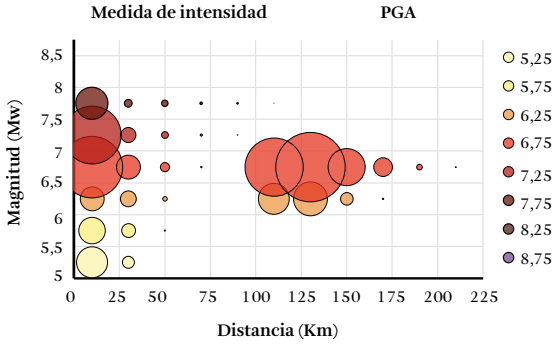

**Participación según magnitud**



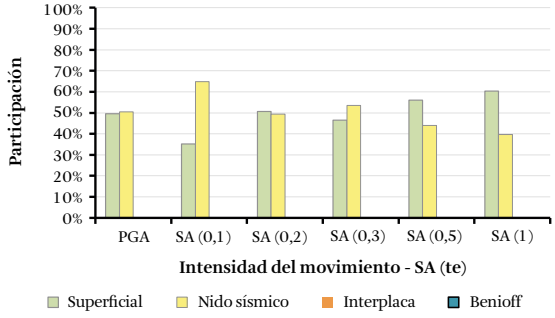

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

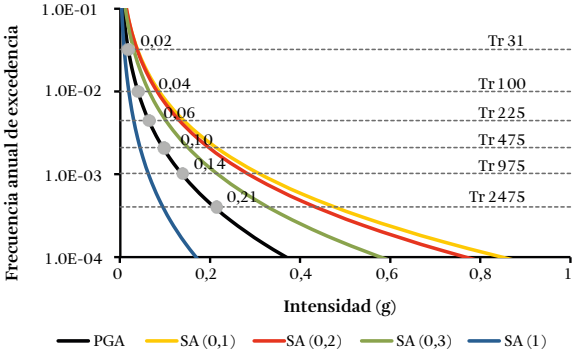



**Participación según ambiente tectónico**

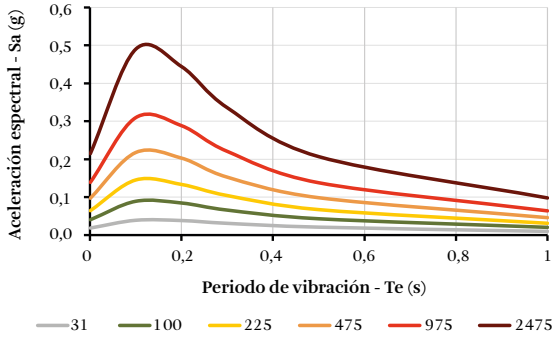


| | |
|---|---|
| **Departamento: Sucre** | **Longitud: -75.39548177** |
| **Municipio: Sincelejo** | **Latitud: 9.302330** |
| **Centro poblado: Sincelejo** | **Período de retorno: 475 años** |

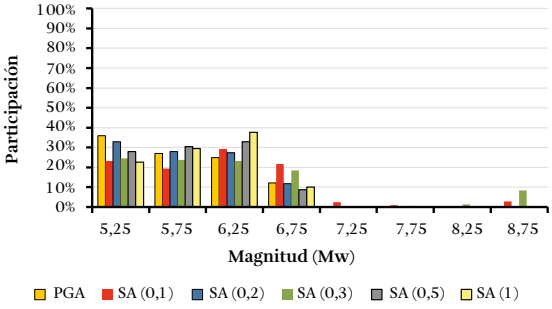
**Curvas de amenaza uniforme**



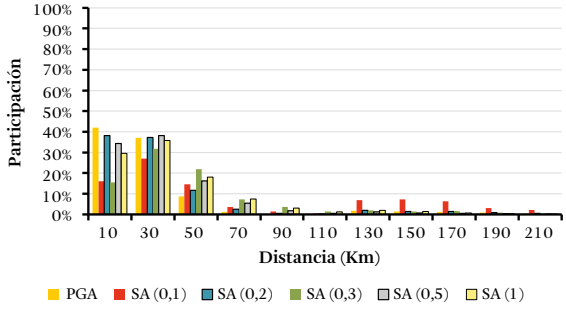

**Espectros de amenaza uniforme**



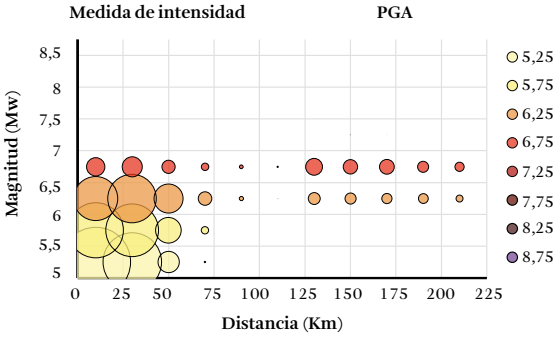

**Participación según magnitud**



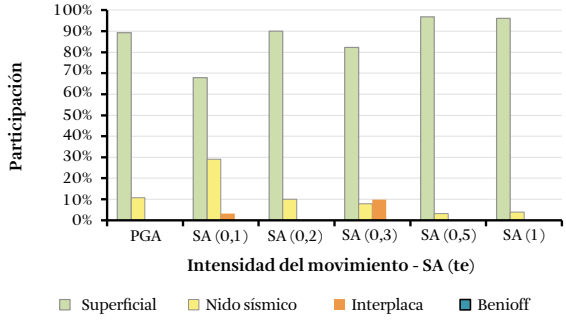

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

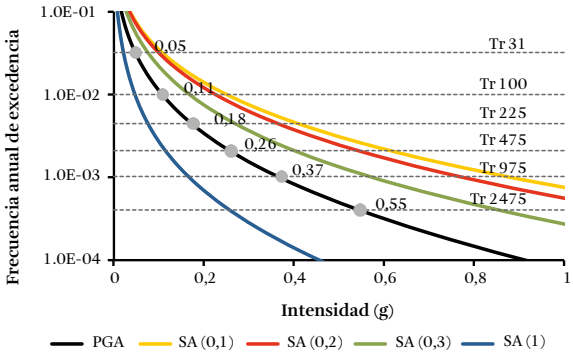



**Participación según ambiente tectónico**

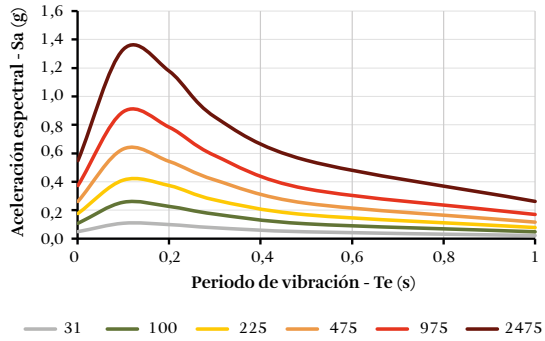


| | |
|---|---|
| **Departamento: Tolima** | **Longitud: -75.119536791** |
| **Municipio: Ibagué** | **Latitud: 4.432809** |
| **Centro poblado: Ibagué** | **Período de retorno: 475 años** |

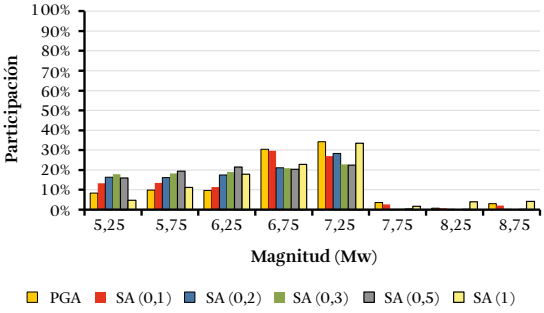
**Curvas de amenaza uniforme**



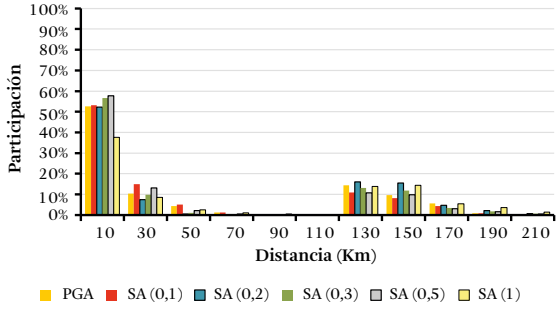

**Espectros de amenaza uniforme**



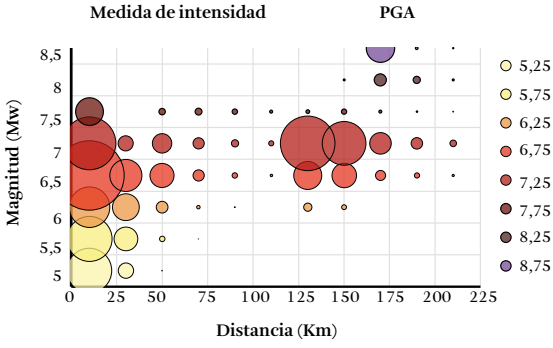

**Participación según magnitud**



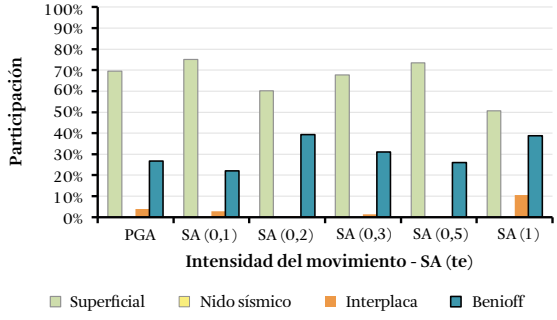

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

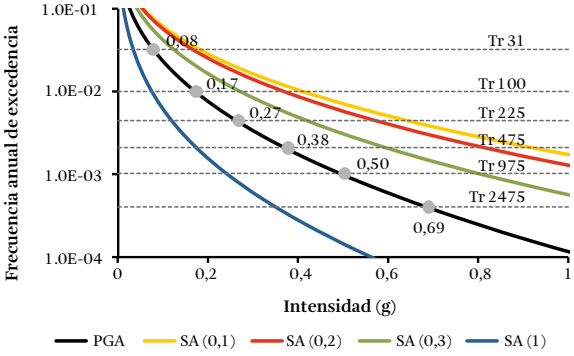



**Participación según ambiente tectónico**

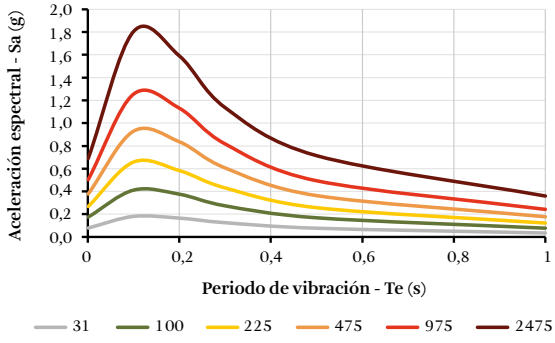


| | |
|---|---|
| **Departamento: Valle del Cauca** | **Longitud: -76.52156016** |
| **Municipio: Cali** | **Latitud: 3.414419** |
| **Centro poblado: Cali** | **Período de retorno: 475 años** |

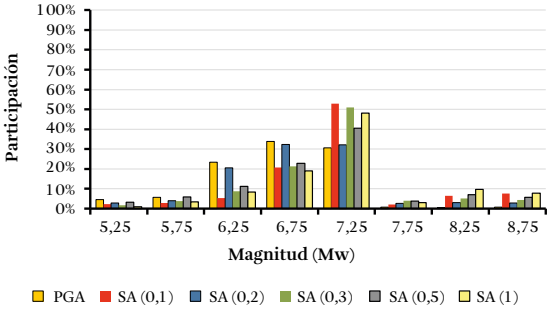
**Curvas de amenaza uniforme**



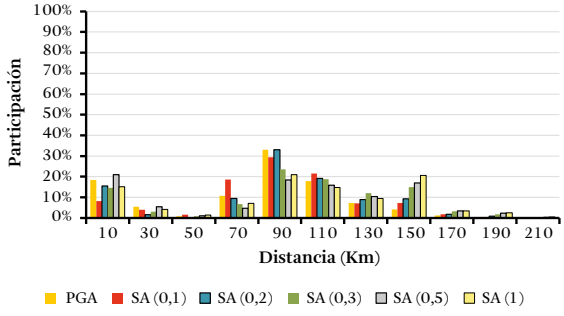

**Espectros de amenaza uniforme**



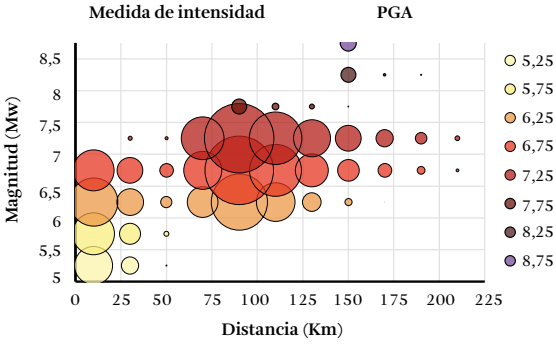

**Participación según magnitud**



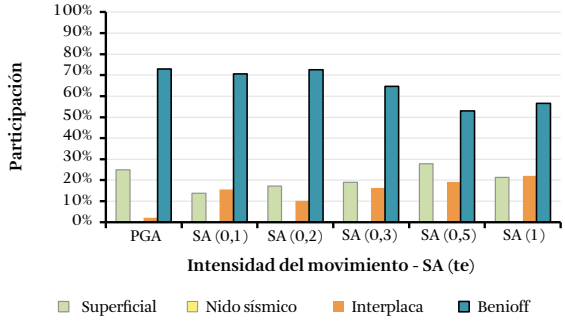

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

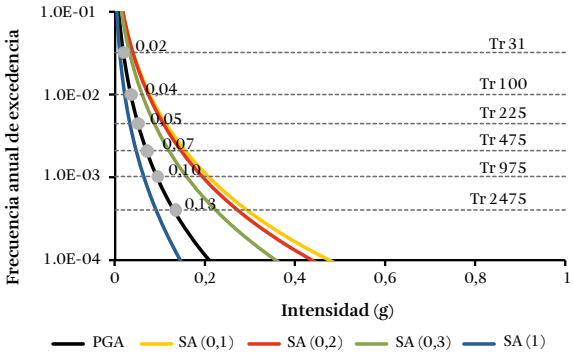



**Participación según ambiente tectónico**

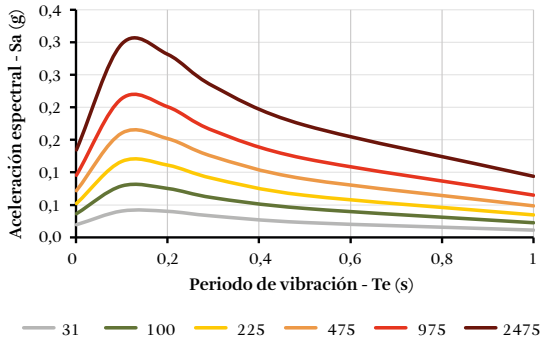


| | |
|---|---|
| Departamento: Arauca | Longitud: -70.7480098 |
| Municipio: Arauca | Latitud: 7.073902 |
| Centro poblado: Arauca | Período de retorno: 475 años |

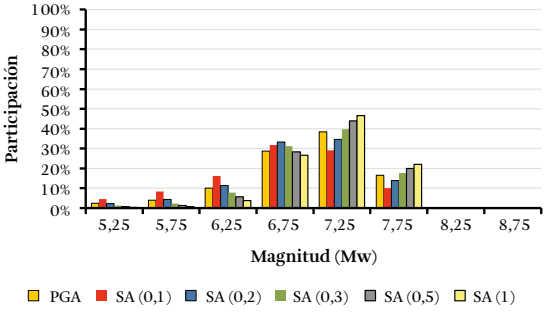
Curvas de amenaza uniforme



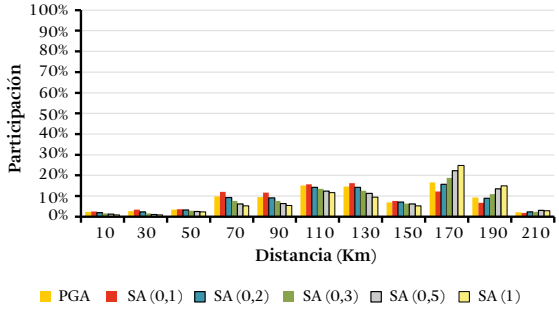

Espectros de amenaza uniforme



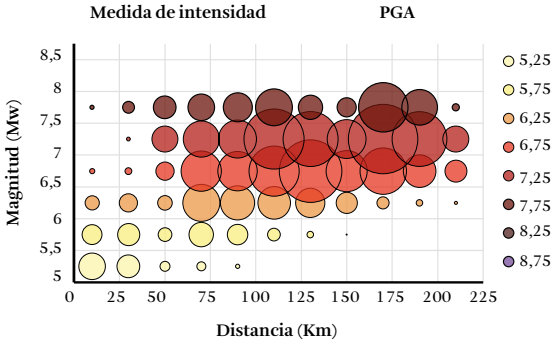

Participación según magnitud



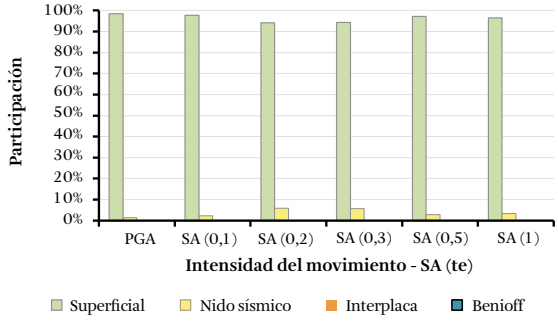

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

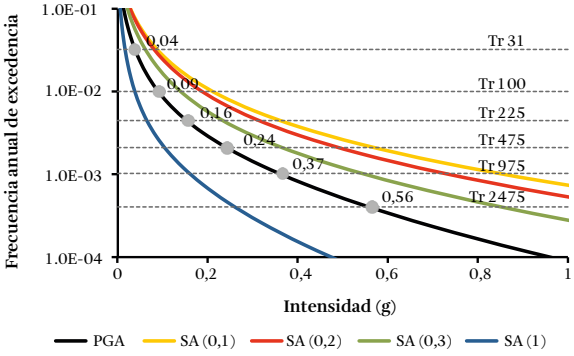



Participación según ambiente tectónico

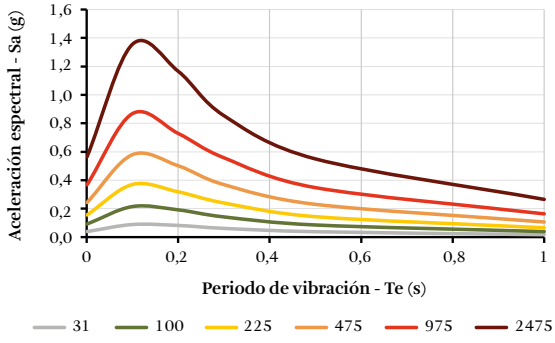


| | |
|---|---|
| **Departamento: Casanare** | **Longitud: -72.39691554** |
| **Municipio: Yopal** | **Latitud: 5.327612** |
| **Centro poblado: Yopal** | **Período de retorno: 475 años** |

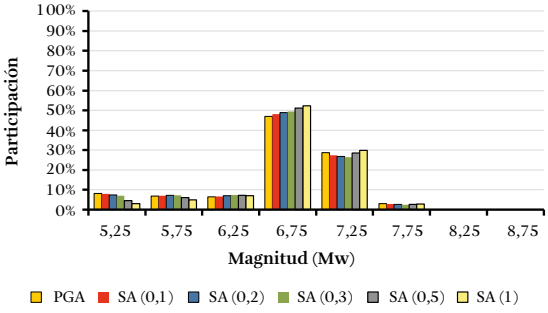
**Curvas de amenaza uniforme**



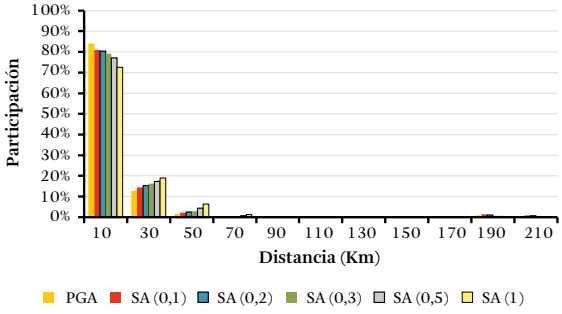

**Espectros de amenaza uniforme**



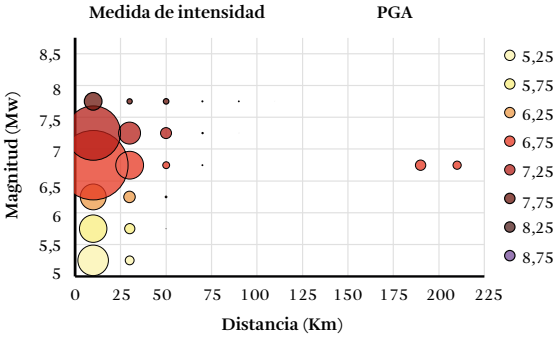

**Participación según magnitud**



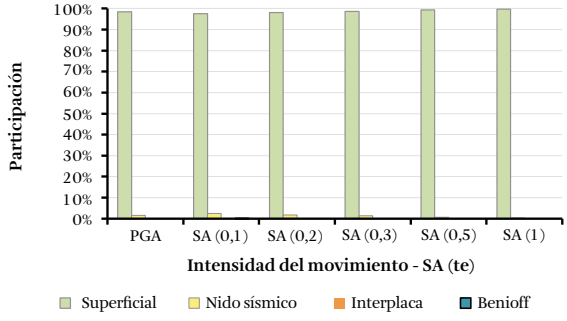

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

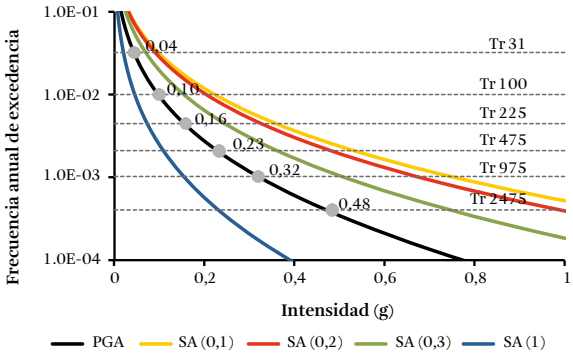



**Participación según ambiente tectónico**

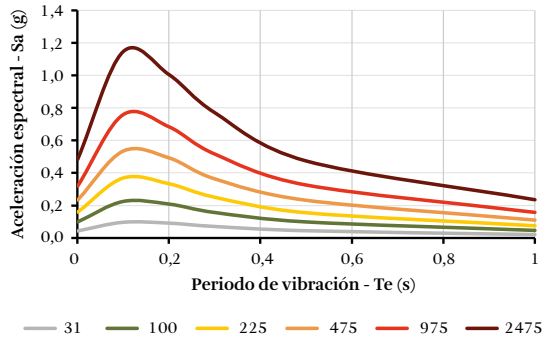


| | |
|---|---|
| Departamento: Putumayo | Longitud: -76.65150686 |
| Municipio: Mocoa | Latitud: 1.152580 |
| Centro poblado: Mocoa | Período de retorno: 475 años |

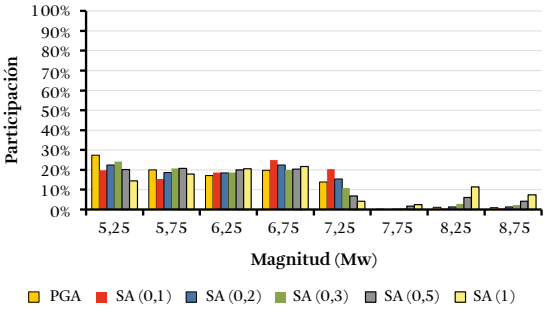
Curvas de amenaza uniforme



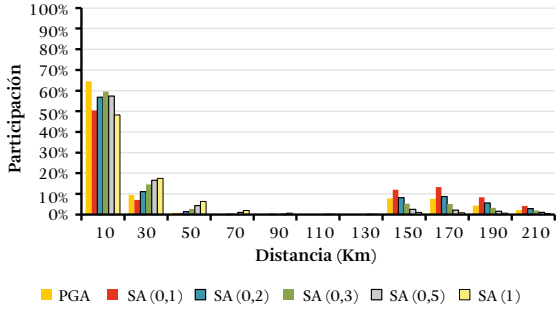

Espectros de amenaza uniforme



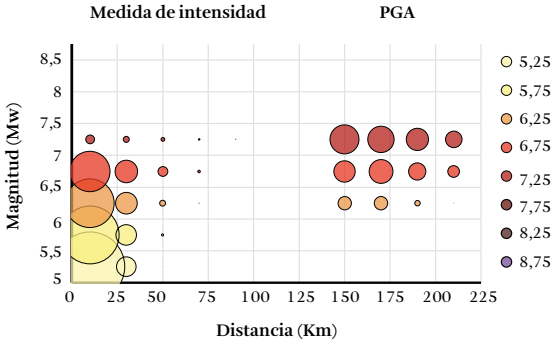

Participación según magnitud



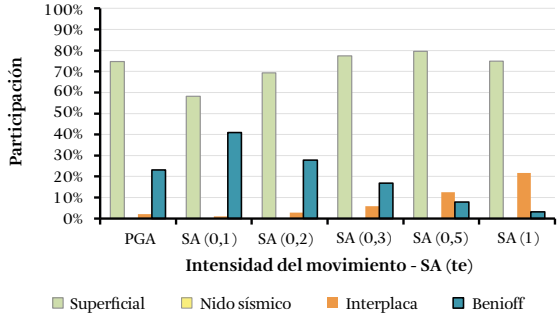

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

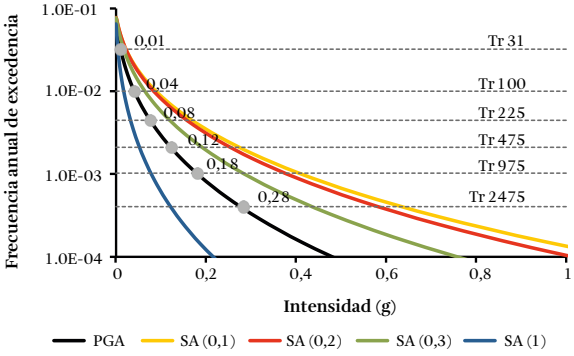



Participación según ambiente tectónico

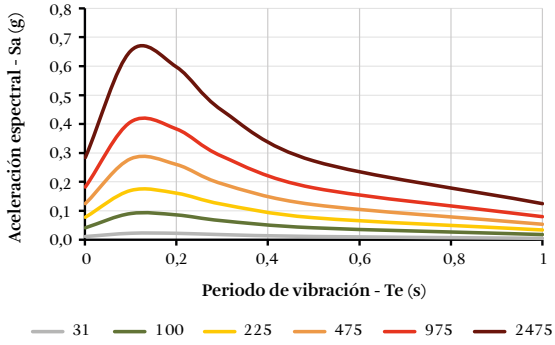


| | |
|---|---|
| **Departamento: San Andrés, Providencia y Sta. Catalina** | **Longitud: -81.70712953** |
| **Municipio: San Andrés** | **Latitud: 12.578138** |
| **Centro poblado: San Andrés** | **Período de retorno: 475 años** |

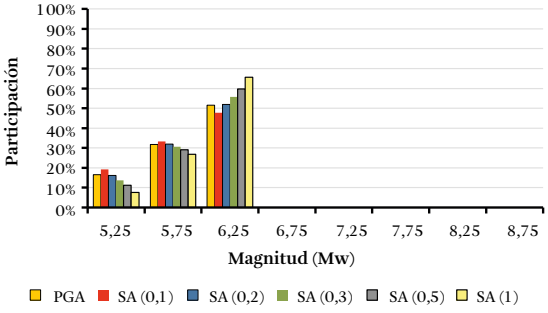
**Curvas de amenaza uniforme**



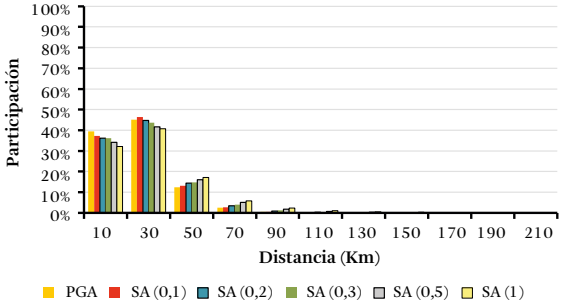

**Espectros de amenaza uniforme**



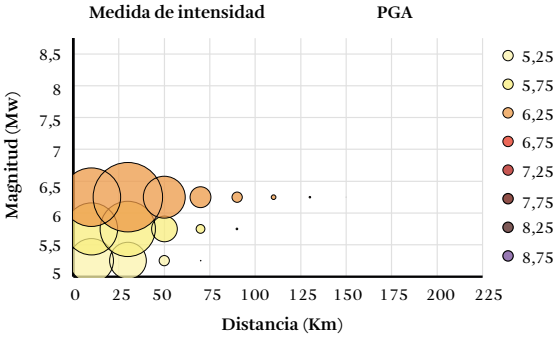

**Participación según magnitud**



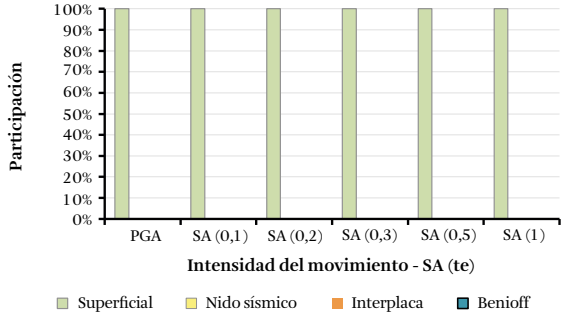

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

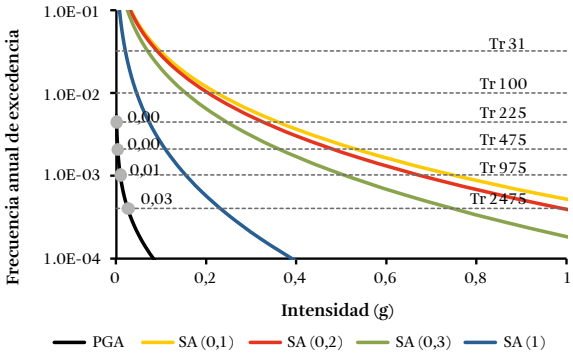



**Participación según ambiente tectónico**

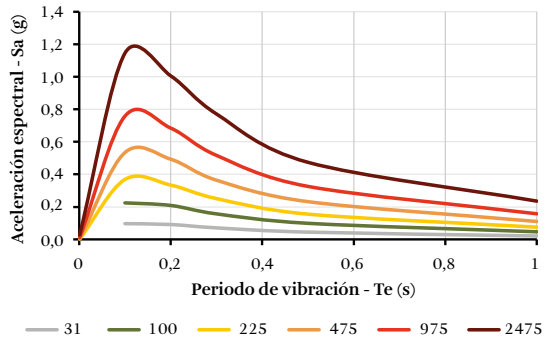


| | |
|---|---|
| Departamento: Amazonas | Longitud: -69.94158189 |
| Municipio: Leticia | Latitud: -4.198445 |
| Centro poblado: Leticia | Período de retorno: 475 años |

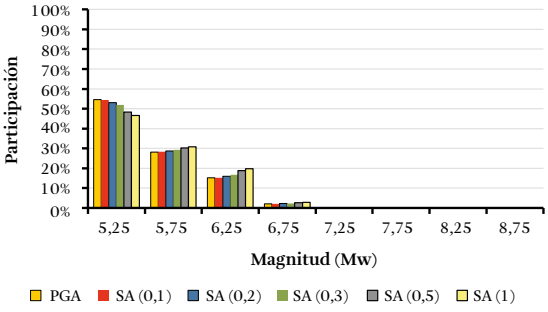
Curvas de amenaza uniforme



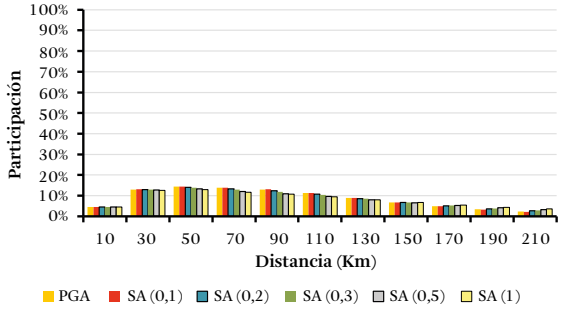

Espectros de amenaza uniforme



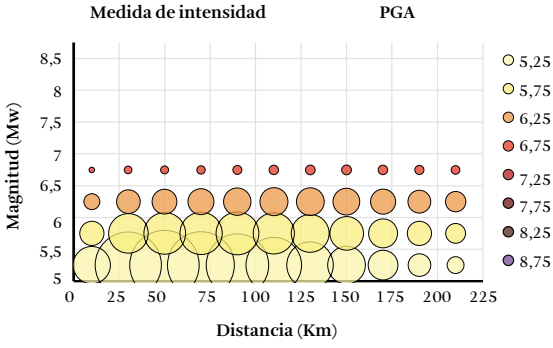

Participación según magnitud



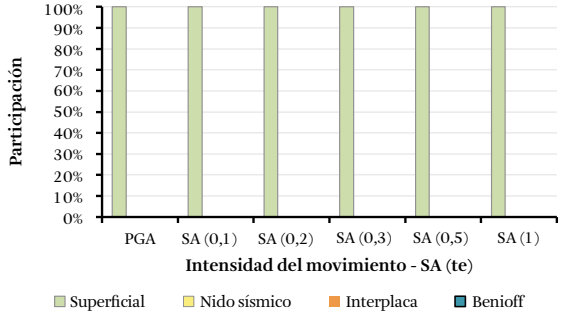

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

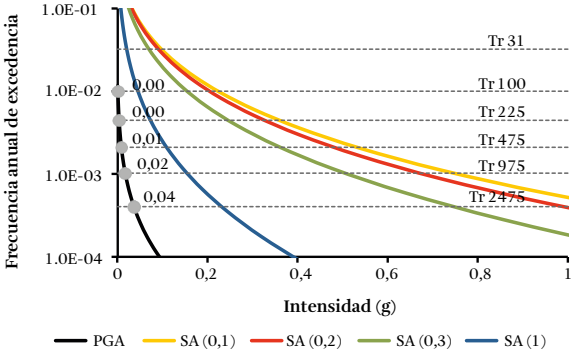



Participación según ambiente tectónico

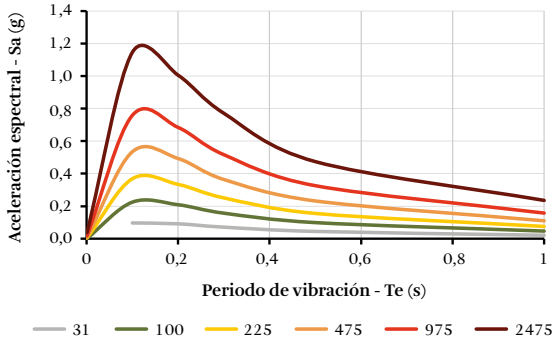


| | |
|---|---|
| **Departamento: Guanía** | **Longitud: -67.91860124** |
| **Municipio: Inírida** | **Latitud: 3.866623** |
| **Centro poblado: Inírida** | **Período de retorno: 475 años** |

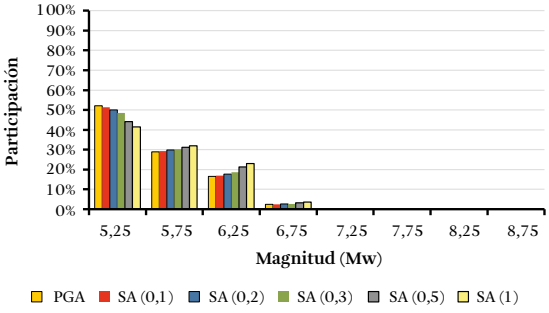
**Curvas de amenaza uniforme**



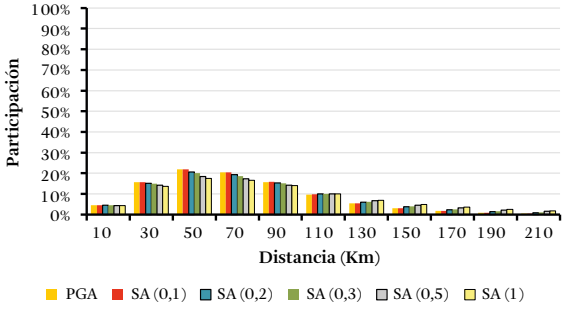

**Espectros de amenaza uniforme**



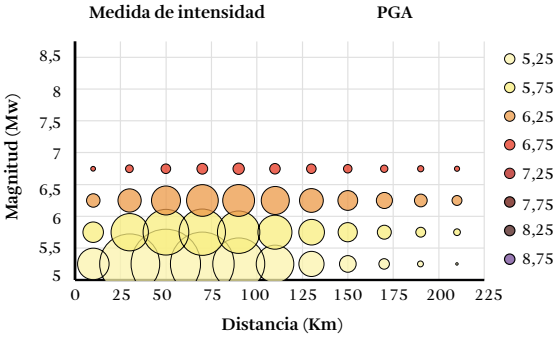

**Participación según magnitud**



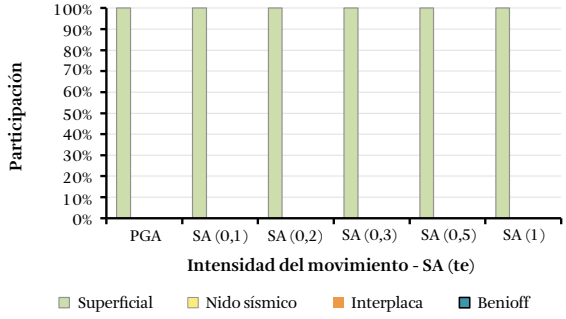

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

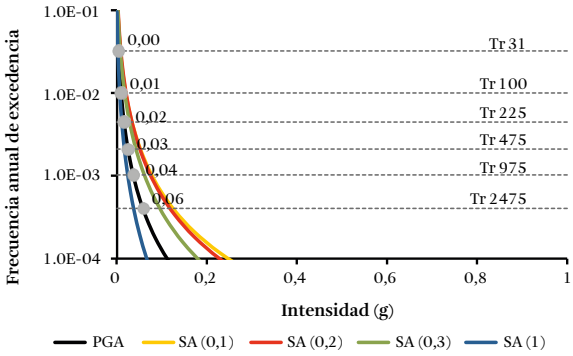



**Participación según ambiente tectónico**

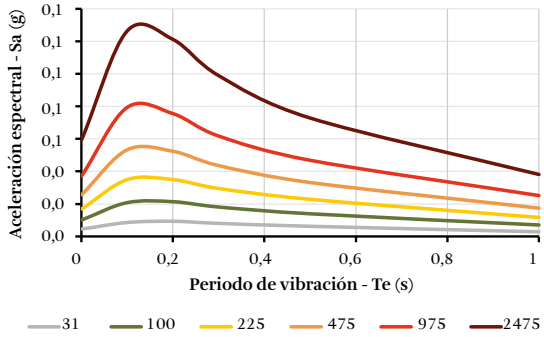


| | |
|---|---|
| Departamento: Guaviare | Longitud: -72.63902872 |
| Municipio: San José del Guaviare | Latitud: 2.566083 |
| Centro poblado: San José del Guaviare | Período de retorno: 475 años |

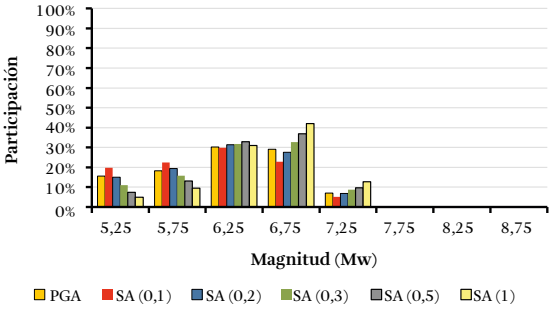
Curvas de amenaza uniforme



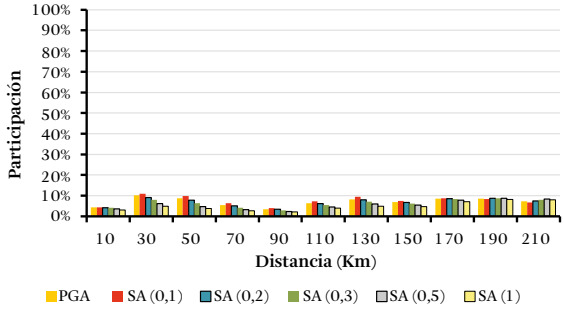

Espectros de amenaza uniforme



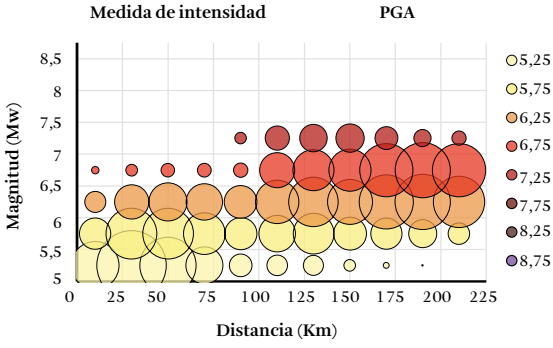

Participación según magnitud



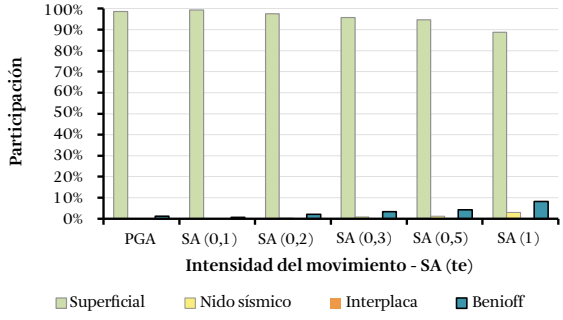

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia

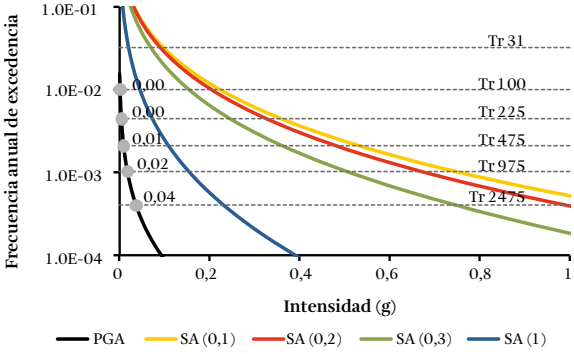



Participación según ambiente tectónico

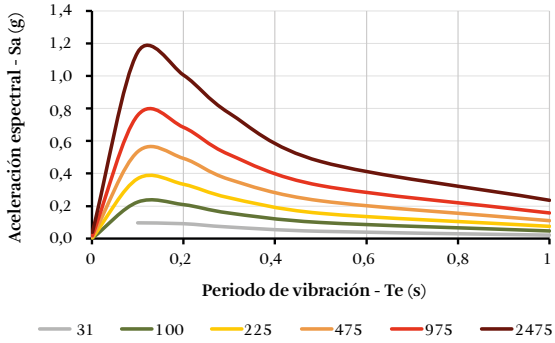


| | |
|---|---|
| **Departamento: Vaupés** | **Longitud: -70.23475148** |
| **Municipio: Mitú** | **Latitud: 1.251187** |
| **Centro poblado: Mitú** | **Período de retorno: 475 años** |

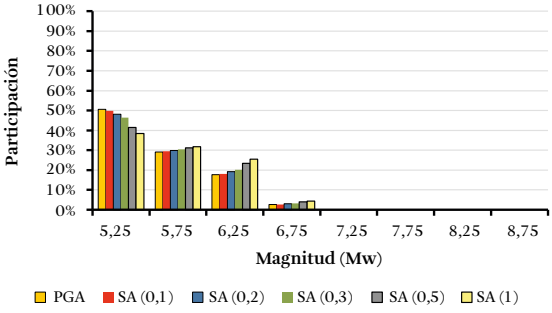
**Curvas de amenaza uniforme**



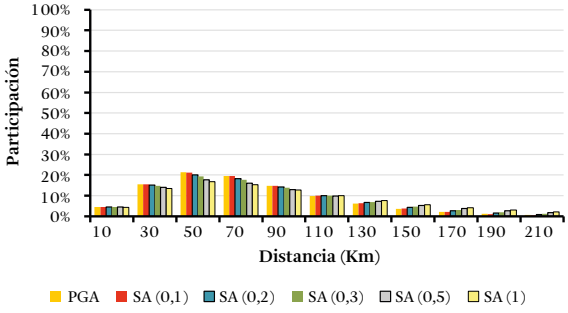

**Espectros de amenaza uniforme**



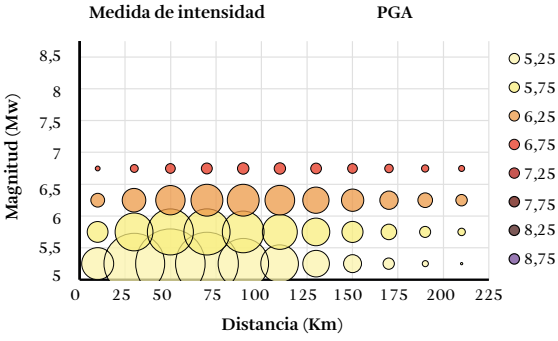

**Participación según magnitud**



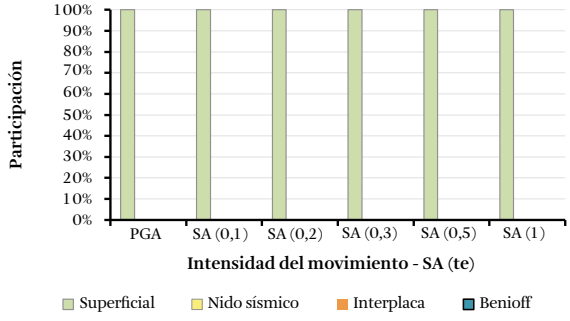

**Participación según distancia**




**Participación según magnitud y distancia**

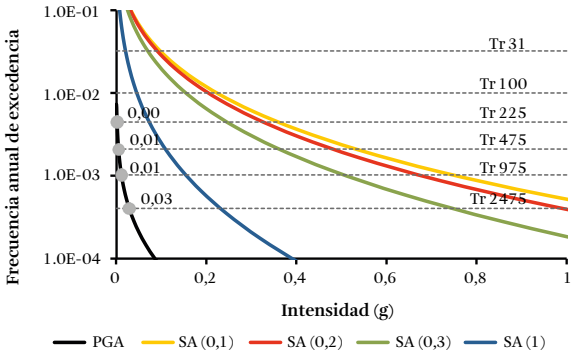



**Participación según ambiente tectónico**

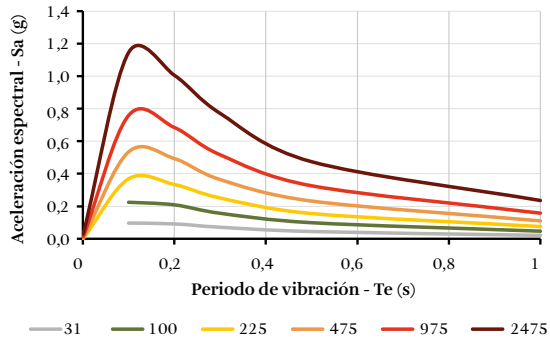


| | |
|---|---|
| Departamento: Vichada | Longitud: -67.48699614 |
| Municipio: Puerto Carreño | Latitud: 6.186863 |
| Centro poblado: Puerto Carreño | Período de retorno: 475 años |

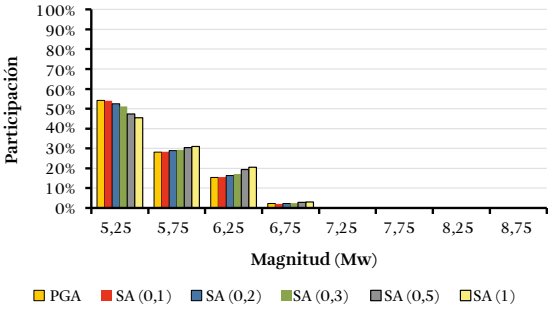
Curvas de amenaza uniforme



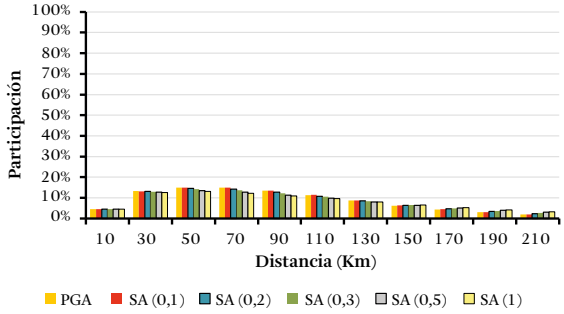

Espectros de amenaza uniforme



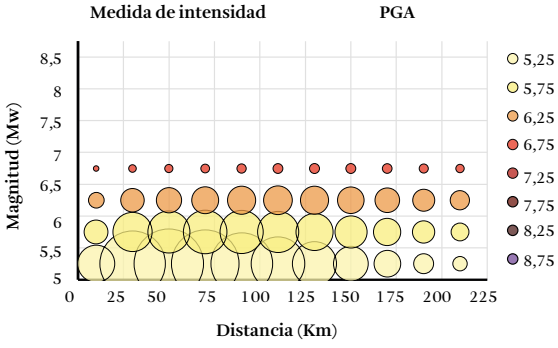

Participación según magnitud



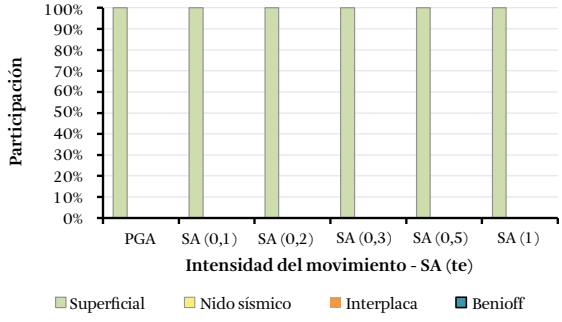

Participación según distancia




Participación según magnitud y distancia




Participación según ambiente tectónico



L

# Descripción del sistema de consulta del modelo y de los resultados de la amenaza sísmica

Colombia, al estar ubicado en una zona con alta actividad sísmica, requiere de información técnica que permita a la población en general conocer la amenaza a la que está expuesta. Para atender a esta necesidad, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en cumplimiento de sus funciones (Decreto 4131 de 2011, Decreto 2703 de 2013), desarrolló un Modelo Nacional de Amenaza Sísmica - MNAS en colaboración con investigadores de la Fundación Global Earthquake Model (GEM).

Este modelo se construyó a partir de una síntesis del mejor conocimiento científico sobre la amenaza sísmica en el país y en la región, considerando a su vez la información que el SGC ha generado durante años. Una descripción general del MNAS puede encontrarse en el siguiente enlace: https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/geoamenazas/Paginas/Sistema-de-Consulta-de-la-Amenaza-Sismica-de-Colombia.aspx

A partir del MNAS se pueden estimar valores de intensidad esperada para diferentes periodos de retorno y periodos de vibración estructural, los cuales pueden ser útiles para diversas actividades de gestión del riesgo sísmico.

Con el fin de que estos resultados sean utilizados, el SGC elaboró un sistema de consulta en el cual tanto el modelo como los resultados se encuentran disponibles al público. Dicho sistema se encuentra en el siguiente link: https://amenazasismica.sgc.gov.co/.

En este Anexo se presentan una descripción breve de dicho sistema de consulta y de los resultados disponibles.

### Productos para la consulta

El sistema de consulta expone tanto el informe de la conformación del modelo como de resultados de la evaluación de la amenaza sísmica en el territorio nacional. El primer módulo del sistema presenta información relacionada a los modelos de fuentes sísmicas, exponiendo tanto propiedades geométricas como parámetros de su actividad sísmica (magnitudes, frecuencias de ocurrencia).

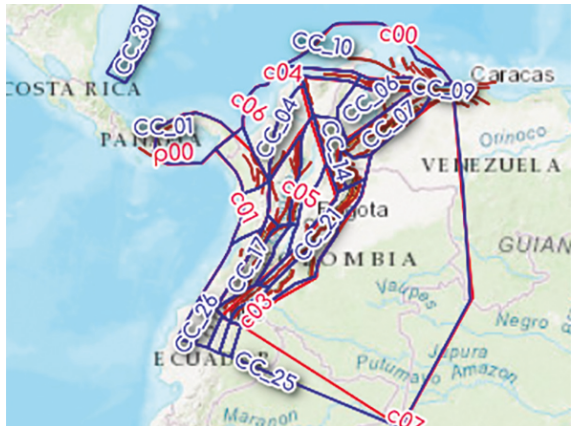
Por otro lado, los módulos de resultados presentan las estimaciones de la amenaza nacional en términos de i) las localizaciones de una grilla regular y ii) las localizaciones de los centros poblados derivados del DIVIPOLA[1]. En estos dos módulos es posible consultar la distribución de intensidades sísmicas para tres ordenadas espectrales, y las curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme para cada uno de las localizaciones.

1 División Político-administrativa de Colombia según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística

### A. Modelo de fuentes sísmicas

La definición de fuentes sísmicas corresponde a una caracterización del territorio según el tamaño y frecuencia de los sismos que pueden generarse. En este módulo se describen las geometrías de los ambientes tectónicos (subducción: intraplaca e interplaca, cortical y el nido de Bucaramanga) incluidos en el modelo de amenaza nacional.

De igual forma, el módulo presenta la geometría de las fuentes y sus parámetros de sismicidad.

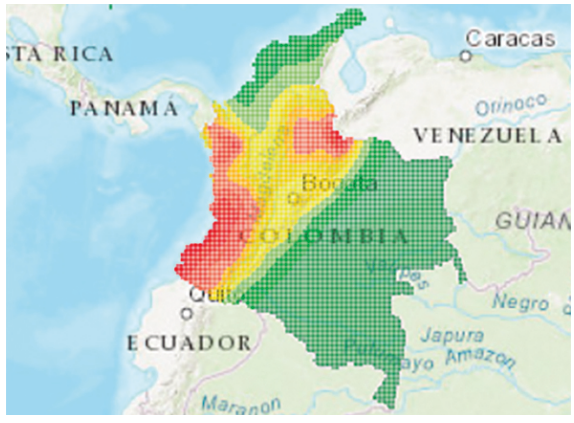



### B. Módulo de resultados de amenaza en roca

*B.1 En puntos de una grilla regular*

Este módulo presenta los resultados probabilistas en roca del *Modelo Nacional de Amenaza Sísmica*. Se presentan en las localizaciones de una grilla regular con espaciamiento de 0.1 grados que corresponde aproximadamente a 10 km.

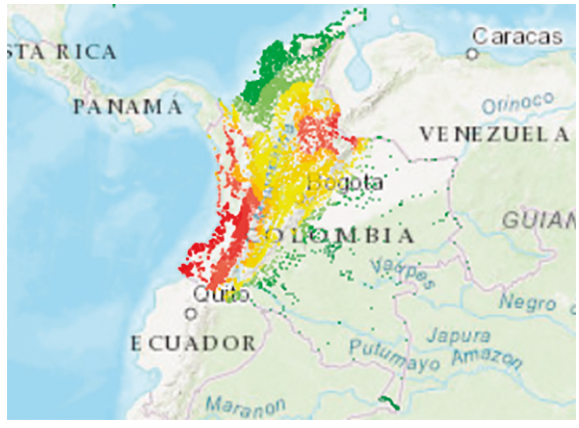
Es posible realizar una búsqueda geográfica del punto más cercano de cálculo digitando en un formato sencillo [#.#### #.####] la longitud y latitud del sitio de interés en la casilla de búsqueda habilitada en el mapa.




*B.2 Para los centros poblados*

Los resultados probabilistas en roca del *Modelo Nacional de Amenaza Sísmica MNAS*, se presentan para cada uno de los centros poblados definidos en la DIVIPOLA del Marco Geoestadístico Nacional (DANE).

Es posible realizar una búsqueda geográfica del centro poblado de interés mediante una lista en el siguiente sitio: https://amenazasismica.sgc.gov.co/portal/sites/




### A. Módulo: Modelo de fuentes sísmicas

Las fuentes sísmicas determinan la distribución geográfica del peligro sísmico (García, 2015), por tanto, es relevante que la definición de un modelo de fuentes sísmicas se realice a partir de datos actualizados, considerando la participación de un equipo multidisciplinario que vincule criterios geológicos, sismológicos y estadísticos, orientados a la estimación de la amenaza en formatos que sean de utilidad para múltiples aplicaciones (ordenamiento territorial, ingeniería, riesgo). Tales son los principios orientadores que el SGC acogió para la elaboración del modelo de fuentes sísmicas del presente MNAS cuya estructura se resume en la Figura L.1.

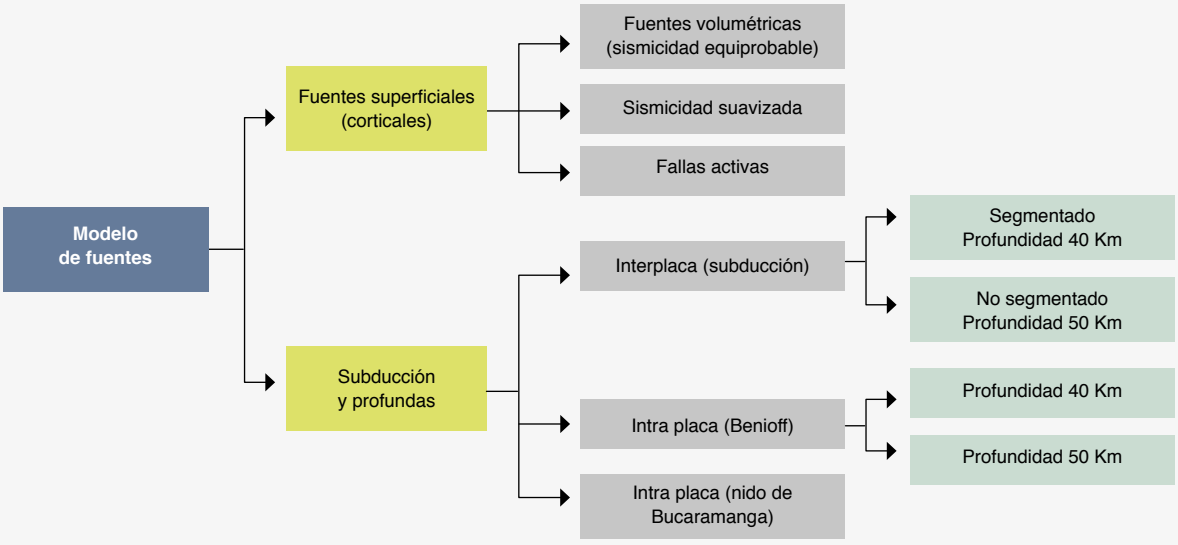



**Figura L. 1** Estructura del modelo según profundidad y tipo de fuentes sísmicas

El modulo presenta las fuentes sísmicas adoptadas, fruto del trabajo conjunto con investigadores del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) donde elaboraron un procedimiento para la definición de fuentes sísmicas (Véase Figura L. 1).

En concordancia con la estructura de la Figura L.1, el módulo despliega las fuentes sísmicas adoptadas en el MNAS, agrupadas en capas según el ambiente tectónico, tal como se presenta en la Figura L.2.

Haciendo clic sobre cada una de las fuentes se despliega en una ventana al margen derecho (recuadro de línea punteada, véase Figura L.3), presentando información relevante para la identificación de la fuente en el modelo, además de información sobre la sismicidad de la falla.

**Figura L.2** Capas del modelo de fuentes

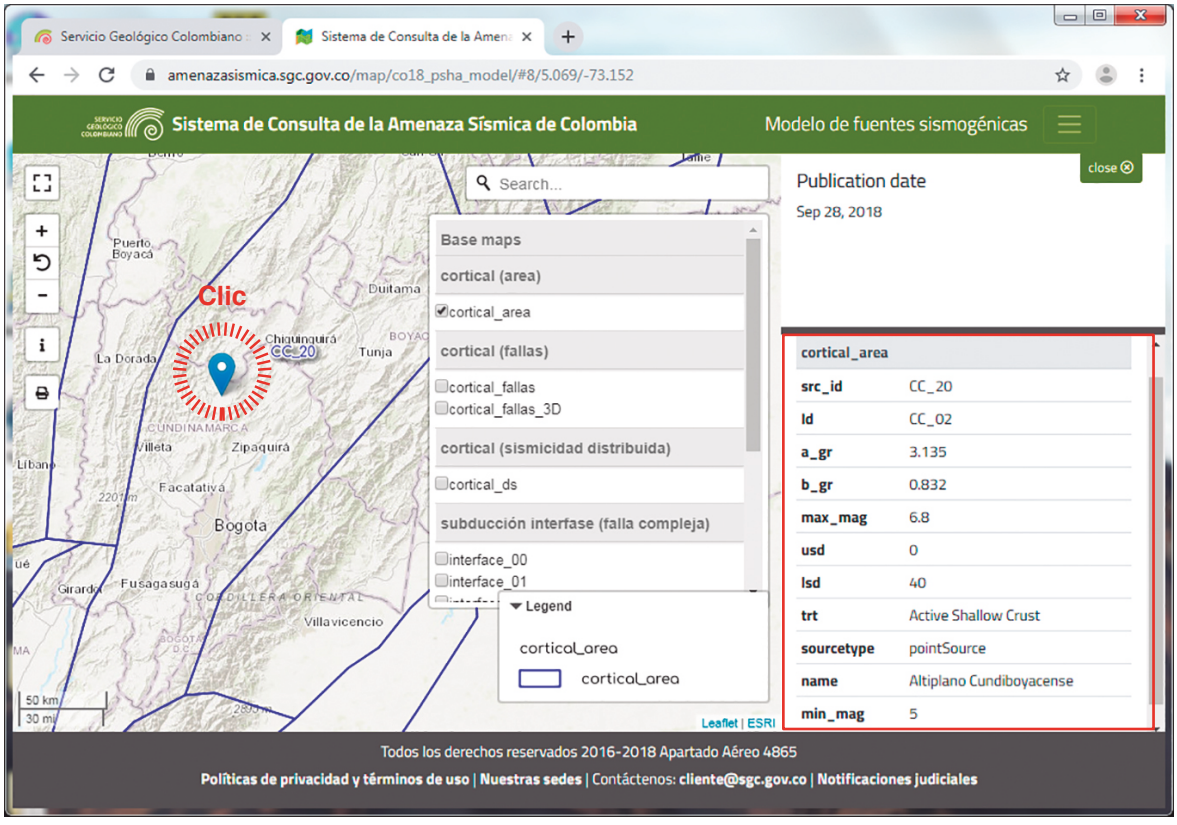



**Figura L.3** Despliegue de información relacionada a cada fuente del MNAS

## B. Módulos de resultados de amenaza en roca

**Figura L.4** Capas de distribución de intensidades

Los resultados en roca del MNAS se presentan en términos de tres (3) productos a saber:

i) La distribución de intensidades en el territorio para ciertos valores de probabilidad de excedencia (2%,5%, 10%, 20%, 80%) en 50 años de tiempo de exposición (véase Figura L.4),

ii) Curvas de en amenaza para tres (3) ordenadas espectrales (*PGA*, $Sa_{(Te=0.2s)}$ y $Sa_{(Te=1.0s)}$; véase Figura L.4), y

iii) Espectros de amenaza uniforme para (2) dos periodos de retronó (475 y 2475 años; véase Figura L.5). Los resultados se presentan en dos (2) módulos con los mismos productos donde el primer módulo presenta los resultados para las localizaciones de una grilla uniforme con espaciamiento de 0.1 grados en el territorio nacional (véase Figura L.6 a Figura L.10), mientras que el segundo presenta los resultados para las localizaciones de los centros poblados según del DIVIPOLA (DANE) (véase Figura L.11).

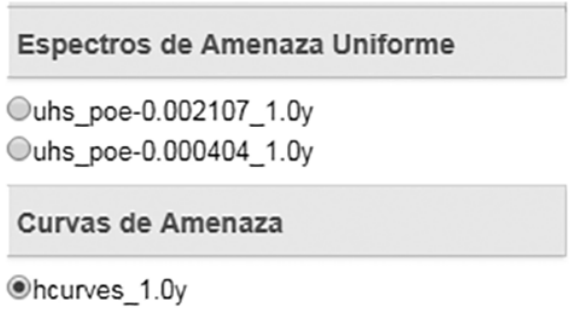



**Figura L.5** Capas de resultados

## Distribución de intensidades

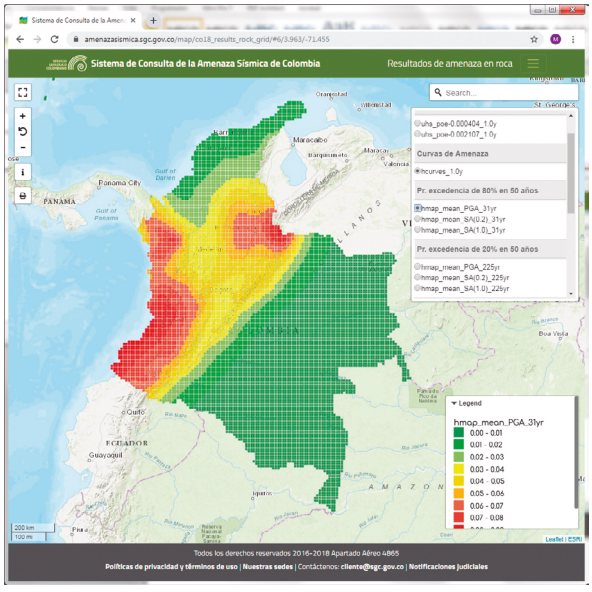



**Figura L.6** Mapa de distribución de intensidades (PGA) probabilidad de excedencia del 80% en 50 años de exposición (periodo de retorno $T_R$ 31 años)

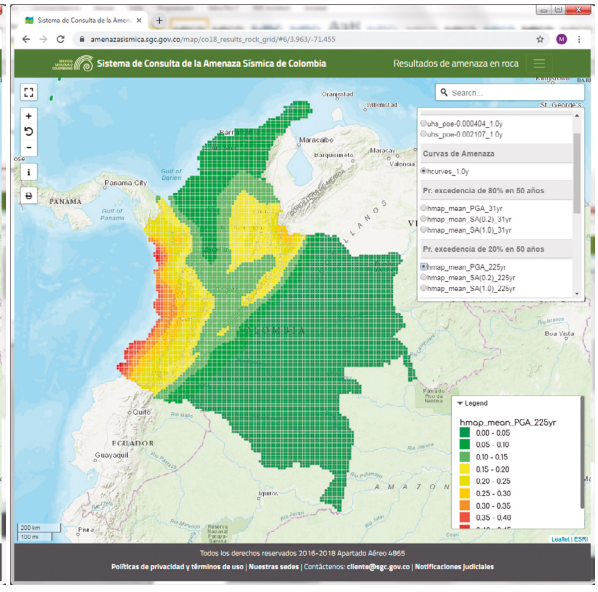



**Figura L.7** Mapa de distribución de intensidades (PGA) probabilidad de excedencia del 20% en 50 años de exposición (periodo de retorno $T_R$ 225 años)

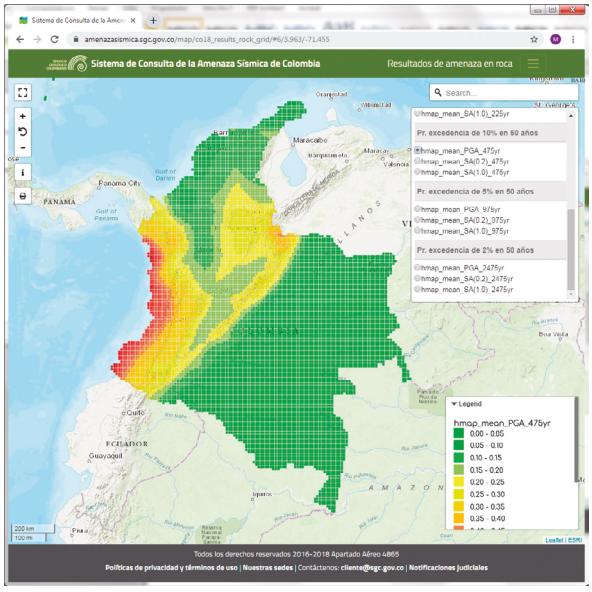



**Figura L.8** Mapa de distribución de intensidades (PGA) probabilidad de excedencia del 10% en 50 años de exposición (periodo de retorno $T_R$ 475 años)

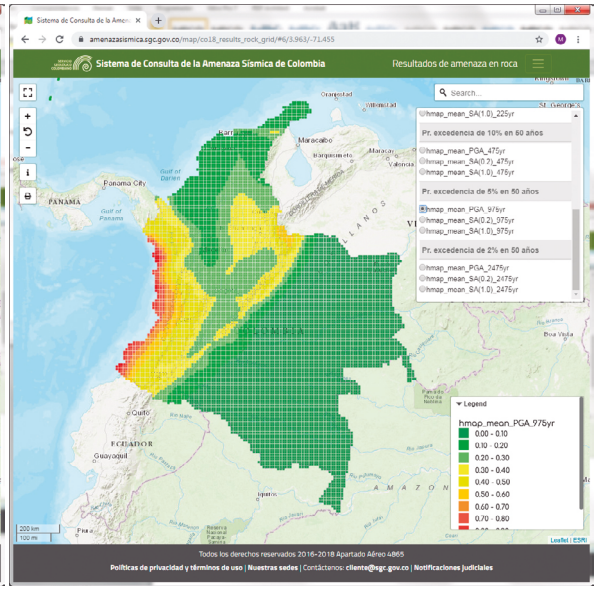



**Figura L.9** Mapa de distribución de intensidades (PGA) probabilidad de excedencia del 5% en 50 años de exposición (periodo de retorno $T_R$ 975 años)

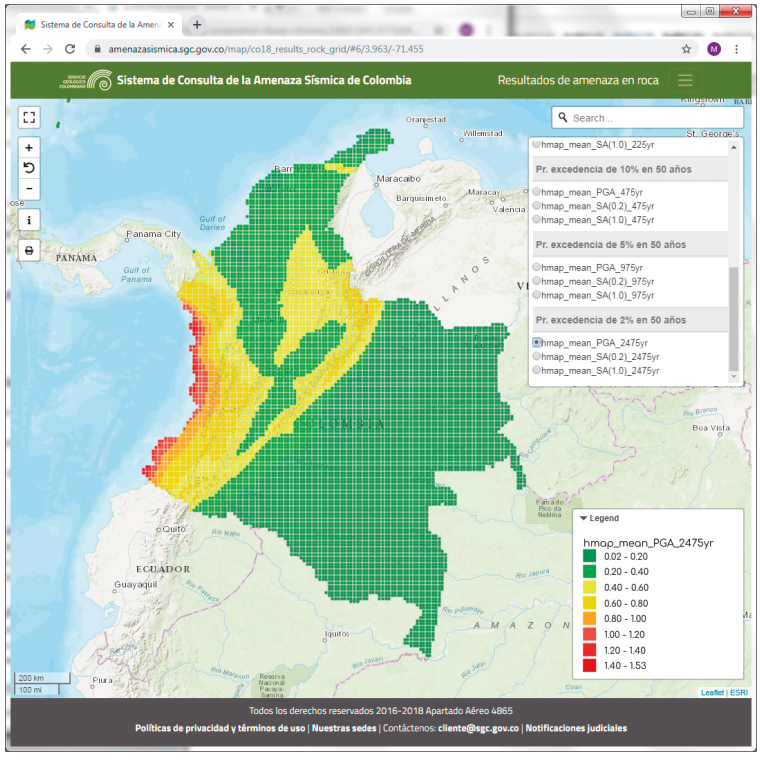



**Figura L.10** Mapa de distribución de intensidades (PGA) probabilidad de excedencia del 2% en 50 años de exposición (periodo de retorno $T_R$ 2475 años)

### Estimaciones en centros poblados

Haciendo una selección del listado de centros poblados (https://amenazasismica.sgc.gov.co/portal/sites/), el módulo abrirá una nueva ventana del mapa con la localización del centro poblado seleccionado (Figura L.12), desde allí es posible desplegar las curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme como se presenta en los numerales siguientes (véase Figura L.13 y Figura L.15).

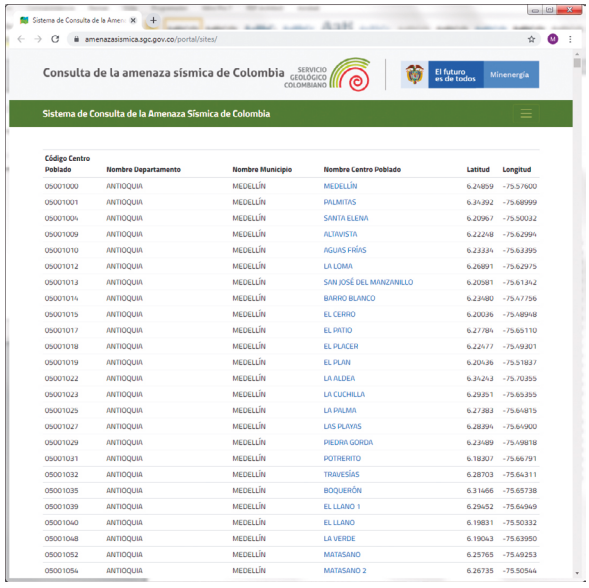



**Figura L.11** Listado para la búsqueda de resultados por centro poblado

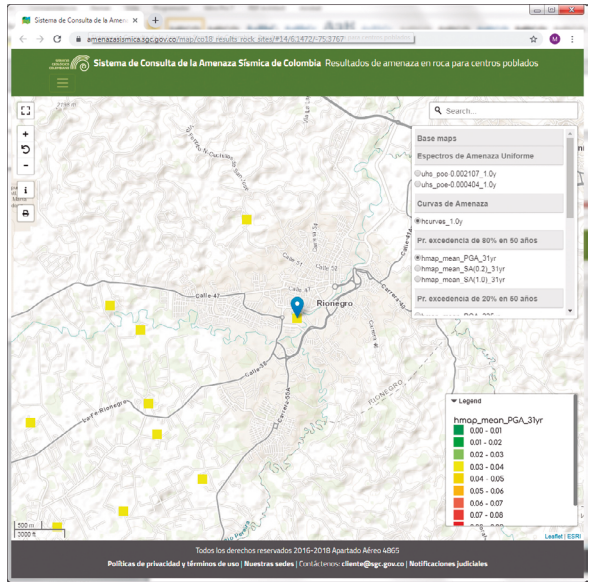



**Figura L.12** Localización geográfica del centro poblado seleccionado

### Curvas de amenaza

Es posible obtener las curvas de amenaza para tres (3) ordenadas espectrales (PGA, $Sa_{(Te=0.2s)}$ y $Sa_{(Te=1.0s)}$) y para cuatro (4) estadísticos (media y percentiles 0.15, 0.5 y 0.85) (Figura L.13).

Seleccionando cualquiera de las localizaciones presentadas en el mapa (como en la Figura L.12 o en la Figura L.14), se despliega la curva de amenaza para dicha localización en una ventana, al margen derecho del sitio web (véase Figura L.14). Debe estar seleccionada la capa de "curvas de amenaza" (hcurves_1.0y).

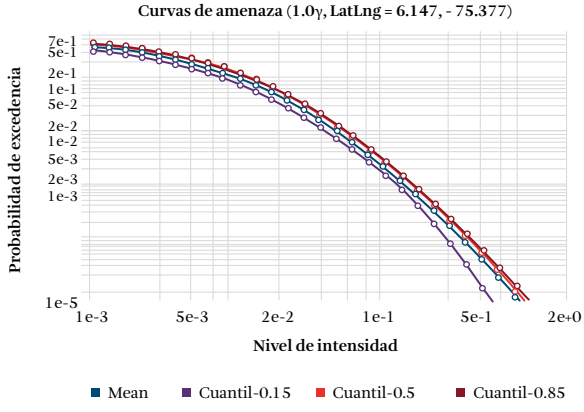



**Figura L.13** Curva de amenaza del centro poblado para la intensidad seleccionada

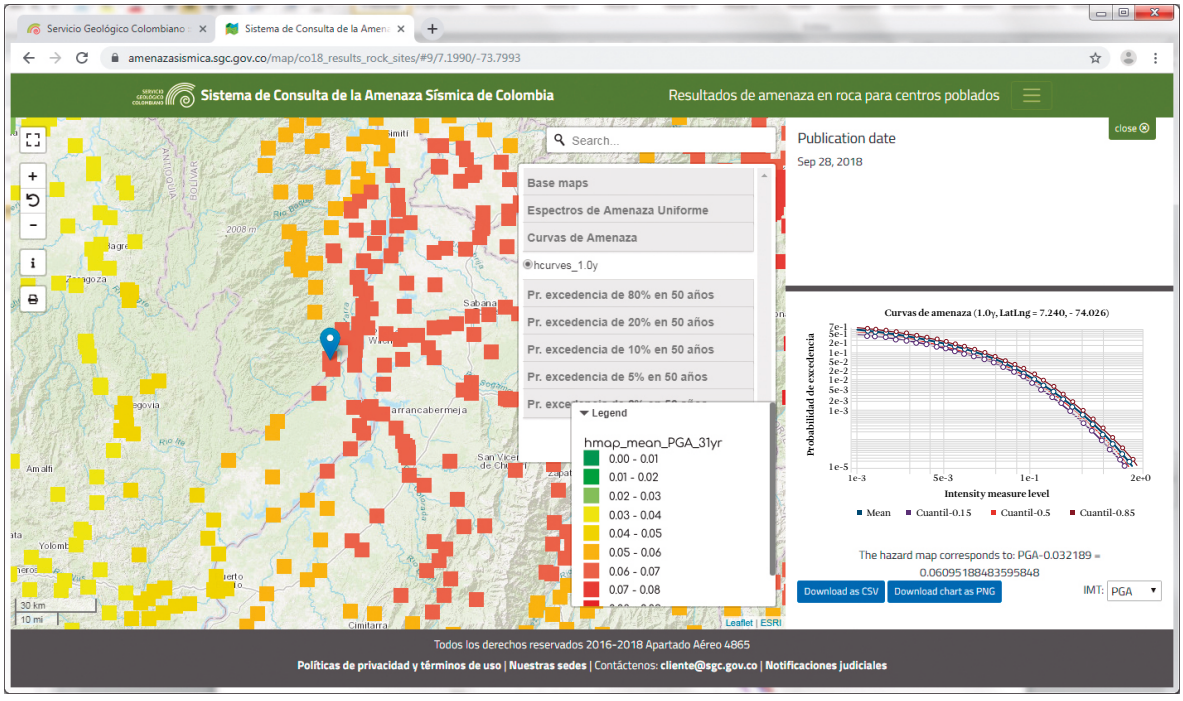
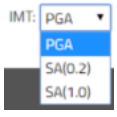



**Figura L.14** Despliegue la curva de amenaza para la localización geográfica de interés.

En la ventana donde se despliega la curva de amenaza (recuadro de línea punteada, véase Figura L.14) se disponen (3) tres funciones: i) para la selección de la medida de intensidad, ii) para descargar los datos de la curva, o iii) una imagen de la curva, como se describe a continuación:

| | |
|---|---|
|   | Es posible seleccionar de la lista de selección que aparece en la esquina inferior derecha de la figura, la ordenada espectral para la cual se quiere consultar la curva de amenaza. |
| Download as CSV | Haciendo clic en este botón es posible descargar los datos de la curva de amenaza (media y percentiles) en formato de texto separado por comas (*.csv). |
| Download chart as PNG | Haciendo clic en este botón es posible descargar una imagen de la curva de amenaza (*.png). |

## Espectros de amenaza uniforme

Esta curva presenta la aceleración esperada respecto de un período estructural (aceleraciones espectrales) asociada a una probabilidad de excedencia dado un tiempo de exposición determinado y para un factor de amortiguamiento respecto al amortiguamiento crítico (véase Figura L.15). Es posible obtener este espectro para 2 (23) periodos de retorno ($T_R$= 457 o 2475 años) y para cuatro (4) estadísticos (media y percentiles 0.15, 0.5 y 0.85).

Seleccionando cualquiera de las localizaciones presentadas en el mapa, se despliega el espectro de amenaza uniforme para dicha localización en una ventana al margen derecho del sitio web (véase Figura L.16). Debe estar seleccionada una de las dos (2) capas de "espectros de amenaza uniforme" (uhs_poe-0.002107_0.1y para $T_R$=475 o uhs_poe-0.000404_0.1y para $T_R$=2475, véase Figura L.16).

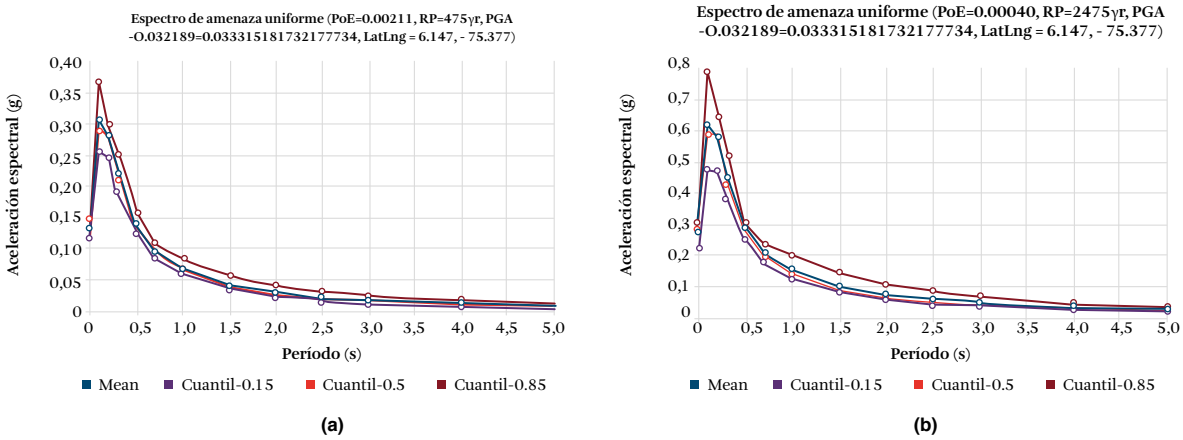



**Figura L.15** Espectro de amenaza uniforme del centro poblado seleccionado (media y percentiles 0.5, 0.5, 0.85) (a) para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años de exposición (periodo de retorno $T_R$ 475 años), y (b) para una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años de exposición (periodo de retorno $T_R$ 2475 años)

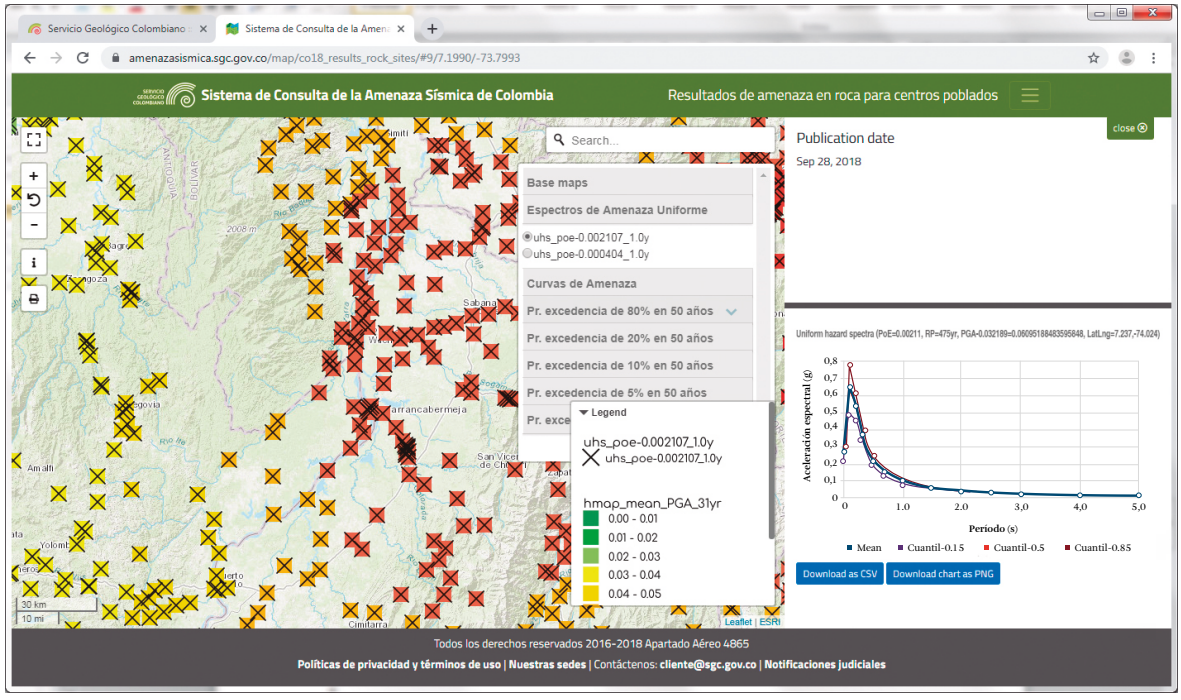



**Figura L.16** Despliegue del espectro de amenaza uniforme para el periodo de retorno y localización geográfica de interés.

En la ventana donde se despliega el espectro de amenaza uniforme (recuadro de línea punteada, véase Figura L.16) se disponen dos (2) funciones: i) para descargar los datos, o ii) para descargar una imagen del espectro, como se describe a continuación:

| | |
|---|---|
| Download as CSV | Haciendo clic en este botón es posible descargar los datos del espectro de amenaza uniforme (media y percentiles) en formato de texto separado por comas (*.csv). |
| Download chart as PNG | Haciendo clic en este botón es posible descargar una imagen del espectro de amenaza uniforme (*.png). |

## Referencias

Decreto 4131 de 2011 "Por el cual se cambia la Naturaleza Jurídica del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas)", Ministerio de minas y energía.

Decreto 2703 de 2013 "Por el cual se establece la estructura interna del Servicio Geológico Colombiano SGC y se determinan las funciones de sus dependencias", Ministerio de minas y energía.

El reto del conocimiento de la amenaza y del riesgo sísmico lo asumimos con legitimidad y observancia científica. Somos conscientes de que el conocimiento no nace de una sola organización y que debe construirse con el aporte de una comunidad técnica. A la vez, la curiosidad propia de los investigadores y el deseo de un mejor conocimiento han permitido que el SGC explore metodologías novedosas y establezca alianzas con expertos nacionales e internacionales para desarrollar un modelo de amenaza sísmica nacional. Teniendo en cuenta estos preceptos, queremos proveer a los tomadores de decisiones la mejor información existente sobre la amenaza y el riesgo sísmico.

ISBN: 978-958-52794-5-2

9 789585 279452