



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

Evaluación de la Amenaza Sísmica de la Falla San Ramón en la Zona de Santiago, Chile.

Memoria de Título presentada por

Horacio Andrés Domínguez Fuenzalida

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

y al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía
Pablo Camilo Heresi Venegas

Enero de 2024



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

Evaluación de la Amenaza Sísmica de la Falla San Ramón en la Zona de Santiago, Chile.

AUTOR:

Horacio Andrés Domínguez Fuenzalida

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL y al grado de MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Pablo Camilo Heresi Venegas

Cristian Emanuel Cruz Doggenweiler

Cesar Rodrigo Pasten Puchi

Santiago, Chile, Enero de 2024

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA DE LA FALLA SAN RAMÓN EN LA ZONA DE SANTIAGO, CHILE.

Resumen

La amenaza sísmica en Santiago de Chile se debe principalmente a la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. No obstante, el descubrimiento de actividad sísmica en la Falla San Ramón supone un nuevo escenario de amenaza. La Falla San Ramón es una falla cortical, y recientes investigaciones han concluido que es capaz de generar terremotos de una magnitud de M_w 6.7 – 7.5. Rupturas en este tipo de fallas en el mundo han generados grandes pérdidas humanas y económicas.

Si bien la amenaza sísmica impuesta por la Falla San Ramón ha sido estudiada anteriormente, hasta hoy no se ha analizado la amenaza mediante un enfoque probabilístico. En este contexto, esta investigación propone comparar la amenaza generada por la subducción de la Placa de Nazca con la de la Falla San Ramón, utilizando modelos de las fuentes sísmicas cuya geometría y recurrencia se obtienen partir de la literatura disponible. Se busca determinar mapas de amenaza mediante enfoques determinísticos y probabilísticos, para conocer el efecto de la Falla San Ramón en Santiago.

Los mapas resultantes mediante un enfoque determinístico muestran zonas en donde la amenaza de la Falla San Ramón llega a ser cuatro veces mayor a la amenaza producida por la Placa de Nazca. Sin embargo, dada la baja recurrencia de la falla, los mapas de amenaza probabilísticos muestran un escenario diferente, donde el aporte de la Falla San Ramón es despreciable en comparación a la generada por la subducción.

La diferencia en los resultados de ambos enfoques no permite aclarar si es necesario modificar las normas de diseño sísmico chilenas en torno a la incorporación de fallas corticales activas. Sin embargo, es esencial regular la urbanización en las proximidades a ellas, en específico de infraestructura crítica. Por otra parte, la incertidumbre en los resultados enfatiza la necesidad de estudiar las características sismogénicas y geométricas de las fallas corticales en el territorio chileno, con el fin de lograr estimar de manera correcta su amenaza sísmica e identificar posibles subestimaciones de diseño sísmico de estructuras.

Palabras claves: Medida de Intensidad, Amenaza Sísmica, Falla Cortical, Análisis Probabilístico de la Amenaza Sísmica, Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica, Aceleración Espectral.

Abstract

The seismic hazard in Santiago, Chile, is primarily a result of its proximity to the subduction zone of the Nazca Plate under the South American Plate. However, the detection of seismic activity on the San Ramón Fault presents a new seismic hazard scenario. The San Ramón Fault is an active shallow crust, and recent investigations have concluded that it can generate magnitudes up to M_w 6.7 – 7.5. Activations on this type of faults have caused major losses worldwide.

Though the seismic hazard caused by the San Ramón Fault has been previously studied, it has not been analyzed using a probabilistic approach. In this context, this investigation aims to compare the hazard imposed by the subduction events with the one generated by San Ramón Fault, by using models of the seismic sources representing their geometry and seismicity obtained from the available literature. As a result, this thesis provides hazard maps computed using both deterministic and probabilistic approaches.

The hazard maps computed by a deterministic approach show zones where the San Ramón Fault generates 4 times the hazard imposed by the subduction events. However, due to the low recurrence of the fault, the hazard maps obtained from a probabilistic approach show completely different results, where the San Ramón Fault hazard has a negligible impact on the study zone compared to the subduction zone.

The difference between the results of each approach does not allow us to determine if it is necessary to modify Chilean seismic design codes to include active crustal faults. However, it is crucial to regulate the urbanization in the proximities of these faults, even more for critic infrastructure. On the other hand, the huge uncertainty on the results exhibits the necessity of studying the seismogenic and geometric characteristics of active crustal faults in Chilean territory, aiming to a better estimation of their seismic hazard and the identification of possible underestimations on the seismic design of structures.

Key words: Intensity Measure, Seismic Hazard, Crustal Faults, Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Deterministic Seismic Hazard Analysis, Spectral Acceleration.

1 Introducción

1.1 Contexto Sísmico en Chile y Santiago

Chile es reconocido como un país de alta sismicidad, debido a que ha sido afectado por grandes terremotos históricos tales como Valdivia 1960, M_w 9.6 (Cifuentes & Silver, 1989), y Maule 2010, M_w 8.8 (Vigny et al., 2011). En efecto, desde el inicio del desarrollo de la instrumentación sísmica, se estima que aproximadamente un 20% de la energía sísmica liberada en el mundo ha sido en el país (Maldonado et al., 2021). Esta alta actividad sísmica se debe a la ubicación de la zona de subducción de la placa de Nazca y la placa Sudamericana (Madariaga, 1998). En general, la sismicidad de Chile se debe a eventos interplaca, los cuales presentan alta recurrencia (Ruiz & Madariaga, 2018). Sin embargo, también se han registrado eventos intraplaca y corticales, como los terremotos de Chillán 1939, M_w 7.8 (Campos & Kausel, 1990), y Las Melosas 1958, M_w 6.3 (Alvarado et al., 2009), los que generaron altas pérdidas y daños en las zonas urbanas próximas.

La ciudad de Santiago, capital de Chile, cuenta con una población cercana a 7,000,000 personas y representa el centro económico del país (Banco Central, 2023). Dado que se encuentra emplazada próxima a la Cordillera de los Andes, sobre la cuenca de Santiago, la ciudad experimenta efectos de amplificación sísmica (Pilz et al., 2011). Esto se ha evidenciado en eventos pasados como los terremotos de Valparaíso 1906, M_w 8.2 (Astroza, 2007), Chillán 1939, M_w 7.8 (Campos & Kausel, 1990), La Ligua 1965, M_w 7.4 (Norambuena, 2006), Algarrobo 1985, M_w 8.0 (Comte et al., 1986), y Maule 2010, M_w 8.8 (Vigny et al., 2011), los cuales han causado daños significativos y pérdidas económicas en la ciudad. Además, al este de Santiago, en el pie de la Cordillera de los Andes, se encuentra la Falla San Ramón (FSR), la cual corresponde a una falla cortical superficial y podría representar una fuente adicional de amenaza sísmica para la ciudad.

1.2 Activaciones de Fallas Superficiales

A lo largo del mundo, las activaciones de fallas superficiales y cercanas a zonas pobladas han causado grandes pérdidas humanas, económicas y desplazamientos de sus hogares de la población. Uno de los ejemplos más conocidos de esto se dio en Japón, donde el terremoto de Kobe 1995, M_w 7.2 (Kanaori & Kawakami, 1996), causó la muerte de 5,500 personas y la destrucción más de 100,000 de casas, 3,500 edificios y 9,400 caminos y puentes (Kanaori & Kawakami, 1996). Según el estudio de Kanaori & Kawakami (1996), la catástrofe generada por el terremoto se debió en gran parte a la presencia de ruptura en superficie y a que la intensidad de movimiento superó ampliamente a la propuesta para diseñar en los códigos sísmicos del país. Otro ejemplo es el terremoto de Chi-Chi 1999, M_w 7.6 (Shin & Teng, 2001), ocurrido en Taiwán, el cual causó el fallecimiento de 2,470 personas y la destrucción de más de 100,000 estructuras, incluyendo casas, edificios, puentes y represas (Shin & Teng, 2001). Además, gran parte de los daños causados por el evento se relacionan con la licuefacción producida en zonas costeras (Shin & Teng, 2001). Ejemplos más recientes son el conjunto de más de 100 terremotos en Puerto Rico durante los años 2019 y 2020, donde el de mayor magnitud fue el ocurrido el día 7 de enero de 2020, M_w 6.4 (Miranda et al., 2020), y los catastróficos terremotos de M_w 7.8 y M_w 7.5 ocurridos en Turquía el año 2023 (Dilsiz et al., 2023). En Puerto Rico, los eventos causaron el colapso de 80 edificios y daños en más de 10,000 estructuras

residenciales. Debido a ello, 8,000 personas fueron desplazados de sus hogares y 63,000 recibieron asistencia en refugios de FEMA (Miranda et al., 2020). Por su parte, en Turquía las cifras son aún más lamentables. Al día de este escrito, se han estimado el número de fallecidos en más de 45,000 personas según la agencia gubernamental de gestión de desastres de Turquía (AFAD, 2023).

Tanto los eventos de Chi-Chi 1999, M_w 7.6 (Shin & Teng, 2001), Puerto Rico 2020, M_w 6.4 (Miranda et al., 2020), como Turquía 2023, M_w 7.8 (Dilsiz et al., 2023), corresponden a terremotos corticales, lo que significa que tienen la misma naturaleza sísmica que la Falla San Ramón. Esto resalta la importancia de estudiar este tipo de fallas, ya que pueden tener un gran impacto en áreas pobladas cercanas.

1.3 Falla San Ramón

La Falla San Ramón es una falla cortical inversa ubicada al este de Santiago, en el piedemonte de la Cordillera de Los Andes. La presencia de la falla fue propuesta por Brüggén (1950). No obstante, recién el año 2002 fue descrita como activa (Rauld, 2002) lo que sería corroborado por diversos autores (Estay et al., 2016; Pérez et al., 2014; Vargas et al., 2014). En particular, el estudio realizado por Vargas et al. (2014) dató, por medio de paleosismología, dos eventos en la falla de magnitud $\sim M_w$ 7.5 en los últimos 17,000 – 19,000 años, concluyendo que esta puede estar preparada para otro gran terremoto.

La traza de la Falla San Ramón cuenta con un 55% de su longitud conocida urbanizada, lo que no se ha tomado en cuenta en las regulaciones urbanas (Easton et al., 2018). En particular, infraestructura crítica como lo son los hospitales FACH, DIPRECA y Militar se encuentran a menos de 2 [km] de la traza de la falla y, a una distancia de aproximadamente 0.5 [km], se encuentra el Centro de Estudios Nucleares de La Reina (CCHEN). Además, estructuras de alta concurrencia también se ubican próximos a la falla, como lo son los centros comerciales de Mall Plaza Los Dominicos, Mall Alto Las Condes y Mall Plaza Tobalaba y un gran número de centros educacionales (ver Figura 1).

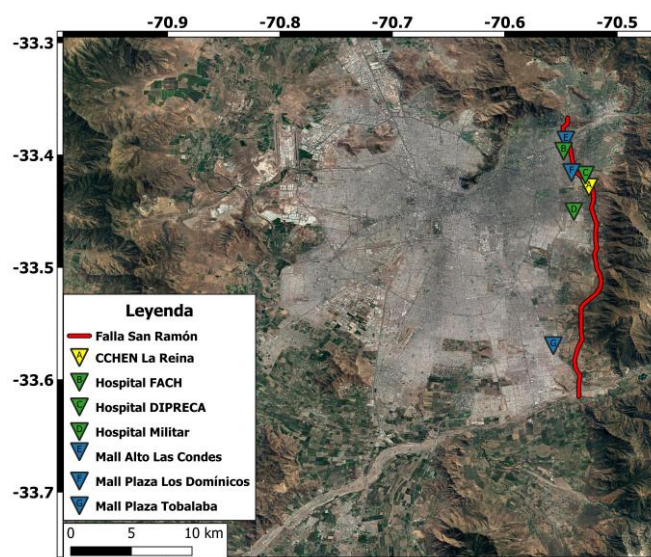


Figura 1. Traza de la Falla San Ramón y ubicación de infraestructura crítica cercana. En amarillo se presenta el Centro de Estudios Nucleares de La Reina (CCHEN La Reina), en verde hospitales y en azul centros comerciales.

Según la base de datos de fallas corticales chilenas de Maldonado et al. (2021), la Falla San Ramón es la de mayor capacidad sismogénica, M_w 7.5, dentro de las fallas catalogadas como activas. Además, su ubicación en el pie cordillerano, la califica como una de las más alejadas de la fosa de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Esta lejanía quiere decir que los eventos interplaca presentan mayor atenuación en los sitios cercanos a la falla. Es por esto que la Falla San Ramón podría ser la falla cortical más propensa a generar zonas de mayor amenaza sísmica en comparación a la amenaza generada por los eventos de subducción.

Dicho lo anterior y considerando la población aledaña a la falla, la correcta estimación de las características sísmicas y geométricas de la Falla San Ramón son de gran importancia. Es por esto que la falla ha sido investigada por variedad de autores, utilizando diferentes metodologías y enfoques, como análisis de evidencias geomorfológicas y geofísicas (Armijo et al., 2010), detección de hipocentros de eventos de magnitudes menores (Estay et al., 2016; Pérez et al., 2014) uso de registros de ondas (Ammirati et al., 2019) e integración de métodos de gravimetría, resistividad eléctrica, magnética y sísmica de sedimento y la roca base de la falla (Yáñez et al., 2020).

Armijo et al. (2010), mediante la creación de un modelo tectónico del escarpe de los Andes, propusieron que la traza de la falla puede alcanzar 30 – 40 [km] de longitud, un ancho de 10 [km] y un manteo de 55°. Sin embargo, investigaciones posteriores han diferido. En cuanto a la longitud de la traza, se ha propuesto desde 4 segmentos independientes de 10 [km] (Estay et al., 2016) hasta un único segmento de 50 [km] (Ammirati et al., 2019). Para el ancho, los valores varían en un rango desde el mencionado por Armijo et al. (2010) hasta 20 [km] propuestos por Ammirati et al. (2019). Mientras que el manteo varía en un rango entre 30° (Pérez et al., 2014) y 65° (Estay et al., 2016).

La amenaza generada por la Falla San Ramón ha sido caracterizada por Estay et al. (2016) y Ammirati et al. (2019), ambos mediante un enfoque determinístico. Estay et al. (2016) consideraron eventos de magnitud M_w 6.7 en cada segmento de la falla propuesto, mientras que Ammirati et al. (2019) tomaron en cuenta un único evento de magnitud M_w 7.5. En ambos estudios, el máximo valor de aceleración máxima del suelo, PGA , estimada es de ~ 0.8 [g], mayor a la experimentada en Santiago durante el terremoto de Maule 2010, M_w 8.8 (Saragoni et al., 2010). Sin embargo, las magnitudes consideradas por ambos autores superan el rango de magnitud máxima estimada por Yáñez et al. (2020), quien propuso valores de M_w 6.0 – 6.5.

1.4 Objetivos

A partir de lo descrito, se puede suponer que la ciudad de Santiago se encuentra amenazada por la Falla San Ramón. Sin embargo, no se puede afirmar si la amenaza es mayor a la generada por los eventos interplaca e intraplaca a los que usualmente está sujeta.

La presente investigación tiene como objetivo general comparar la amenaza sísmica generada por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana con la de la Falla San Ramón en Santiago, cuantificada por medio de diferentes intensidades.

Para ello se definen los siguientes objetivos específicos:

1. Modelar las fuentes sísmicas (interplaca, intraplaca y Falla San Ramón), tomando en cuenta su geometría como su tasa de sismicidad, a partir de la información recopilada por investigaciones anteriores.
2. Estimar la amenaza sísmica en Santiago, para diferentes medidas de intensidad, producida por la Falla San Ramón y por los eventos de subducción.
3. Generar mapas de amenaza para identificar zonas donde la amenaza generada por la Falla San Ramón sea mayor a la de la subducción de la placa de Nazca.

Las zonas obtenidas donde la amenaza generada por la Falla San Ramón supere a la causada por eventos de subducción se denominará zona de predominio de la Falla San Ramón.

2 Marco Teórico

La ingeniería sísmica basada en el desempeño tiene como objetivo proteger y resguardar a la población ante eventos telúricos, mediante el diseño adecuado de las estructuras y edificios y la toma de decisiones informadas para el bienestar de la población (Deierlein et al., 2003). Para esto, es esencial caracterizar la amenaza sísmica en el sitio donde se construirá la estructura, estimar la respuesta que tendrá la edificación ante dicha amenaza, evaluar los daños potenciales en función de la respuesta estructural y, finalmente, valorar las pérdidas humanas, económicas y de tiempo de operación que pueda causar el daño (Deierlein et al., 2003; Moehle & Deierlein, 2004).

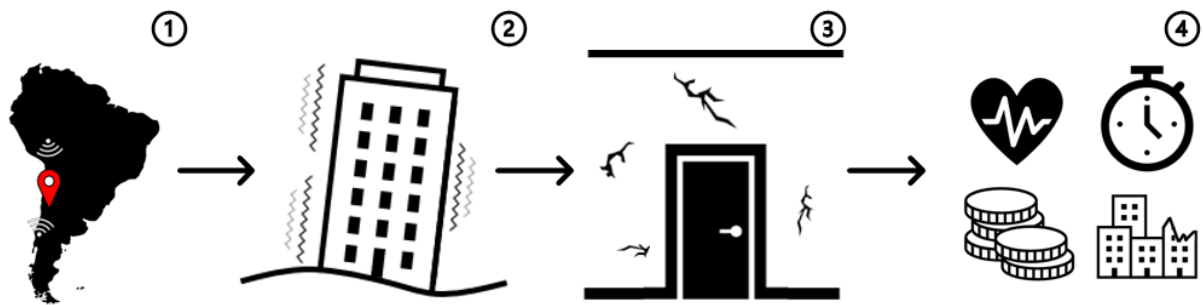


Figura 2. Secuencia lógica de la ingeniería sísmica basada en el desempeño. 1. Identificación de las fuentes y estimación de la amenaza sísmica. 2. Modelación y evaluación de la respuesta dinámica de la estructura. 3. Estimación de los daños que puedan ocurrir en la estructura. 4. Valoración de las pérdidas humanas, económicas y de tiempo de operación.

El primer paso señalado en el esquema de la Figura 2 es determinar los niveles de intensidad que se espera que generen las diversas fuentes sísmicas en el sitio de estudio. Para lograr esto, es necesario identificar las fuentes que puedan afectar al sitio, caracterizar las propiedades del suelo en el sitio y emplear modelos movimiento fuerte que estimen la intensidad en el mismo (Cornell, 1968; Esteva, 1967).

El segundo paso implica determinar las respuestas que puede presentar la estructura ante los niveles de intensidad obtenidos en el paso anterior (Deierlein et al., 2003). Es crucial seleccionar cuidadosamente los parámetros de demanda a considerar y elaborar un modelo preciso de la estructura o de componentes estructurales relevantes. Además, es esencial hacer una correcta selección de registros sísmicos para llevar a cabo los análisis de respuesta (Bommer et al., 2010).

El tercer paso relaciona la respuesta de la estructura con los daños esperados en ella. Se deben considerar daños estructurales, no estructurales y de maquinaria u otros elementos sensibles (Deierlein et al., 2003).

Finalmente, a partir de la información obtenida en los tres pasos anteriores, se estiman las pérdidas causadas. En general, se evalúa la cantidad de fallecimientos, heridos, costo de reparaciones o pérdida económica debida a la interrupción de operaciones (Krawinkler & Miranda, 2004; Moehle & Deierlein, 2004).

Teniendo en cuenta los objetivos de la presente investigación, esta tesis se encuadra en el primer paso descrito en la Figura 2, la caracterización de la amenaza sísmica.

2.1 Análisis de amenaza sísmica

En la ingeniería civil, el diseño sísmico de las estructuras se basa en asignar un valor de intensidad sísmica para estimar las solicitaciones sobre sus elementos. La intensidad sísmica de un registro se refiere a un parámetro que represente las propiedades del registro que afectan la respuesta estructural (Moehle & Deierlein, 2004). Es decir, la intensidad sísmica es un valor que resume los efectos de un evento sísmico sobre una estructura.

El análisis de la amenaza sísmica busca lograr estimar la intensidad sísmica para la cual diseñar una estructura en un lugar específico. Para ello, es esencial conocer rigurosamente dos elementos fundamentales; las fuentes sísmicas y el sitio donde emplazará la estructura (Cornell, 1968; Esteva, 1967). Para caracterizar correctamente las fuentes sísmicas es necesario conocer su naturaleza sísmica (evento interplaca, intraplaca o falla cortical), su capacidad sismogénica (rango de magnitudes que es capaz de generar) y su ubicación (Baker, 2013). En cuanto al sitio donde se llevará a cabo el análisis de amenaza, es importante conocer los parámetros del suelo que afectan la respuesta en superficie, como su periodo fundamental, velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m] o un indicador del tipo de suelo (Kramer, 1996).

Una vez caracterizadas todas las fuentes sísmicas y el sitio de estudio, se requiere relacionar estos parámetros para obtener la intensidad. Para ello, se han desarrollado modelos matemáticos que predicen la distribución probabilística de las intensidades a partir de la magnitud de momento M , la distancia entre el sitio y la fuente R , el tipo de fuente sísmica, parámetros del suelo del sitio y, en algunos casos, otros factores considerados por el autor (Cornell, 1968; Esteva, 1967). Estos modelos son conocidos como Modelos de Movimiento Fuerte (GMM por sus siglas en inglés *Ground-Motion Models*) y se representan según la Ecuación 1.

$$\ln(\overline{IM}), \sigma_{\ln IM} = GMM(M, R, \theta) \quad (1)$$

Donde $\ln(\overline{IM})$ representa la mediana logarítmica y $\sigma_{\ln IM}$ la desviación estándar logarítmica de la distribución de intensidades, mientras que θ engloba los parámetros del suelo y otros elegidos por el autor de la GMM, además de la magnitud M y la distancia R .

Es importante destacar que las GMM no son capaces de predecir con exactitud el valor de la intensidad esperada, sino que, como se menciona en el párrafo anterior, los valores entregados por una GMPE corresponden a los parámetros de una distribución de las intensidades (generalmente una distribución log-normal). Por lo que sus resultados tienen grados de incertidumbre epistémica y aleatoria.

Los análisis de amenaza sísmica se pueden realizar mediante dos metodologías, las que difieren en la cantidad de escenarios sísmicos considerados y en la consideración de su probabilidad de ocurrencia: (1) Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica; y (2) Análisis Probabilístico de la Amenaza Sísmica. El primer enfoque busca estimar los niveles de intensidad esperados para un único escenario sísmico,

escogido normalmente por el criterio del peor escenario posible (máxima magnitud de la fuente y mínima distancia del sitio a la fuente). Esta metodología desestima la probabilidad de que una activación en la fuente sísmica de estudio alcance su máxima magnitud y se ubique justamente en la posición más cercana al sitio, además de no considerar otros posibles eventos sísmicos en la fuente. El segundo enfoque busca determinar la probabilidad de exceder niveles de intensidad en el sitio de estudio. Para ello, se consideran todos los posibles eventos (combinaciones de magnitud y distancia) junto con su probabilidad de ocurrencia.

2.2 Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica.

La primera metodología es el Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica (DSHA por sus siglas en inglés *Deterministic Seismic Hazard Analysis*). En este enfoque se selecciona arbitrariamente una única magnitud de momento y ubicación de su hipocentro o ruptura para cada fuente sísmica. Por lo general, se escoge la magnitud de momento máxima que puede generar la falla y la ubicación más cercana al sitio de estudio, lo que se define como “peor escenario posible” (Reiter, 1990).

La Figura 3 representa un esquema de un análisis determinístico de amenaza sísmica. En ella, se muestran en azul y amarillo dos fuentes sísmicas, fuente 1 y 2 respectivamente, de distinta naturaleza, capacidad sismogénica y geometría. Siguiendo el criterio del peor escenario posible, la magnitud escogida para cada falla es la máxima que puede generar cada una, $M_{max\ 1}$ y $M_{max\ 2}$ respectivamente. La distancia mínima desde el sitio de estudio (señalado con un pin rojo en la Figura 3) es $R_{min\ 1}$ y $R_{min\ 2}$ para las fuentes 1 y 2 respectivamente. Dado que las fuentes son de distinta naturaleza sísmica, la intensidad media de cada una, \overline{IM}_1 e \overline{IM}_2 , se estima utilizando diferentes modelos de movimiento fuerte, GMM_1 y GMM_2 , cada una con sus respectivos valores de magnitud y distancia, pero con los mismos parámetros del suelo del sitio de estudio, el periodo fundamental del suelo, T , y la velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m], V_{s30} . Finalmente, de las intensidades medias obtenidas para cada fuente, se escoge el máximo valor, \overline{IM}_{max} .

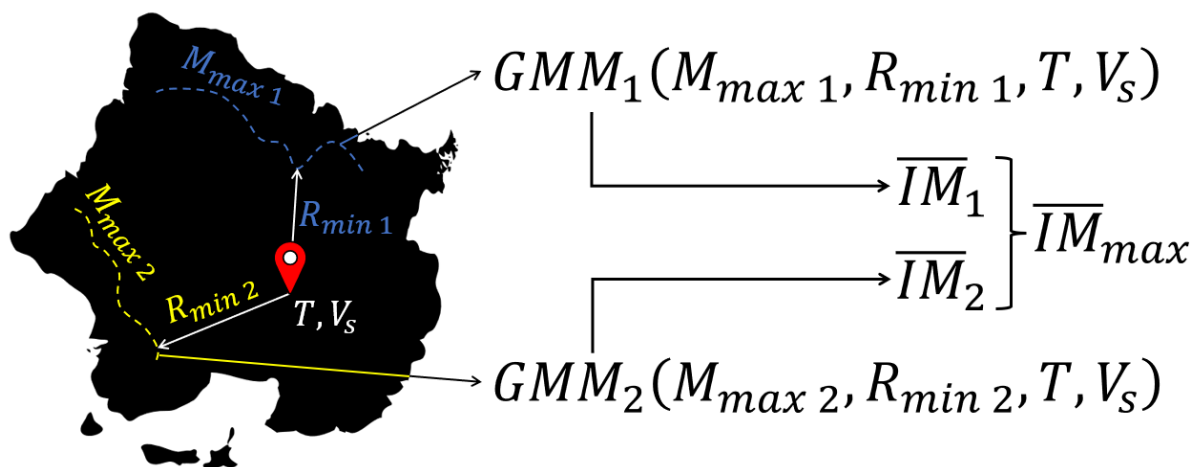


Figura 3. Esquema del procedimiento del Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica.

El resultado de este enfoque es una cantidad de intensidades igual al número de fuentes sísmicas estudiadas, por lo que se escoge el valor más alto entre ellas. Además, Krinitzsky (2002) recomienda utilizar

el valor de intensidad del percentil 84 de su distribución (16% de probabilidades de excedencia), ya que, al suceder el peor escenario posible, la mediana de la intensidad tiene un 50% de probabilidades de ser superada.

Es importante mencionar que este enfoque se puede utilizar para más de un sitio y más de una intensidad. Un ejemplo de ello son los espectros de amenaza determinísticos, donde se varía la intensidad (cambiando el periodo de la ordenada espectral). Con ellos, se puede conocer la aceleración que experimentará un sistema de 1 grado de libertad con cualquier periodo. Además, al variar el sitio, se puede generar mapas de amenaza de una zona específica, permitiendo conocer las zonas más demandadas sísmicamente.

Para poder estimar la magnitud máxima a considerar en el peor escenario posible se utilizan relaciones entre la magnitud de momento y la geometría de la falla. Por lo general, se utilizan las ecuaciones de momento sísmico (Ecuaciones 2 y 3) de Hanks & Kanamori (1979). Estas ecuaciones dependen del área de ruptura, A , el desplazamiento (slip) promedio, u y la rigidez de la corteza terrestre, μ (usualmente $30 [GPa]$).

$$M_o = \mu A u \quad (2)$$

$$M_w = \frac{2}{3} (\log(M_o) - 9.1) \quad (3)$$

Donde M_o es el momento sísmico y M_w la magnitud de momento. Ambas ecuaciones se utilizan en unidades del sistema internacional.

Cuando no se dispone de toda la información de la falla, se recurre a relaciones empíricas. Un ejemplo es la relación entre el largo y la magnitud propuesta por Wells & Coppersmith (1994) para fallas corticales inversas, presentada en las Ecuaciones 4 y 5:

$$M_w = 5 + 1.22 \log(L) \quad (4)$$

$$\sigma_{M_w} = 0.28 \quad (5)$$

Donde M_w es la magnitud de momento esperada en la falla y σ_{M_w} su desviación estándar. La longitud, L , se utiliza en kilómetros.

En el caso de no contar con el dato de la magnitud de momento de un evento pasado, se utilizan ecuaciones que relacionan otras magnitudes con esta. Un ejemplo de estas relaciones son las de Scordilis (2006), las que se presentan en las Ecuaciones 6 y 7.

$$M_w = 0.85m_b + 1.03 \quad 3.5 < m_b < 6.2 \quad (6)$$

$$M_w = \begin{cases} 0.67M_s + 2.07 & 3.0 < M_s < 6.1 \\ 0.99M_s + 0.08 & 6.2 < M_s < 8.2 \end{cases} \quad (7)$$

2.3 Análisis probabilístico de la amenaza sísmica (PSHA).

El análisis probabilístico de la amenaza sísmica procura considerar todos los escenarios posibles, tomando en cuenta su probabilidad de ocurrencia (Baker, 2013; Cornell, 1968; Esteva, 1967). A diferencia del enfoque determinístico, se reconoce que las fuentes sísmicas son capaces de generar un rango de magnitudes y su hipocentro o ruptura se puede ubicar en cualquier posición dentro de la falla. Así, para estimar la amenaza se debe generar un modelo matemático que represente estos rangos de magnitud y distancia, y sus correspondientes funciones de probabilidad (Baker, 2013; Cornell, 1968; Esteva, 1967).

El objetivo principal del análisis probabilístico de la amenaza sísmica es determinar las probabilidades de ocurrencia de las magnitudes y ubicaciones de los eventos asociados a una fuente, junto con la probabilidad de que estos eventos excedan un nivel intensidad (Cornell, 1968; Esteva, 1967). Para incorporar todas las probabilidades, el pilar fundamental del PSHA es el Teorema de las Probabilidades Totales. Bajo este contexto, resulta fundamental determinar las funciones de probabilidad de las magnitudes y distancias al sitio de estudio de una determinada fuente sísmica. En el caso de las magnitudes, se han propuesto diversos modelos de recurrencia que permiten estimar las funciones de densidad de probabilidades de observar una magnitud en una fuente sismogénica (Gutenberg & Richter, 1944; Schwartz & Coppersmith, 1984).

2.3.1 Modelos de Recurrencia

Los modelos de recurrencia son modelos matemáticos que buscan relacionar el número esperado de eventos, N_m , que excedan una magnitud determinada, m , en una fuente sísmica dado un periodo de tiempo específico. Generalmente, la recurrencia se expresa a través de los modelos de Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1944), Gutenberg-Richter Acotado (Gutenberg & Richter, 1944) o de Escenario Característico (Schwartz & Coppersmith, 1984). Por otra parte, en la práctica, el número de eventos se normaliza por el periodo de tiempo considerado, expresándose como una tasa de excedencia anual, λ_m , en lugar de N_m .

El modelo de Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1944) establece una relación logarítmica entre la tasa de excedencia y la magnitud, la cual es determinada por los parámetros a y b (ver Ecuaciones 8 a 10) que son ajustados para cada fuente sísmica específica. Asimismo, el modelo incorpora una magnitud mínima, m_{min} , ya que eventos de magnitudes muy pequeñas generan intensidades imperceptibles (Baker, 2013).

$$\text{Modelo:} \quad \log(\lambda_m) = a - b \cdot m, \quad m \geq m_{min} \quad (8)$$

$$\text{Función de Distribución Acumulada:} \quad F_M = 1 - 10^{-b(m-m_{min})}, \quad m \geq m_{min} \quad (9)$$

$$\text{Función de Densidad de Probabilidades:} \quad f_M = b \ln(10) 10^{-b(m-m_{min})}, \quad m \geq m_{min} \quad (10)$$

Por su parte, el modelo de Gutenberg-Richter Acotado consiste en una variación del modelo anterior. Tal como se aprecia en las Ecuaciones 11 a 13 en este modelo se incluye la magnitud máxima que es capaz de generar la falla, m_{max} , dada su tamaño finito y naturaleza sismogénica (Baker, 2013).

$$\text{Modelo:} \quad \log(\lambda_m) = a - b \cdot m, \quad m_{min} \leq m \leq m_{max} \quad (11)$$

Función de Distribución Acumulada:

$$F_M = \frac{1 - 10^{-b(m-m_{min})}}{1 - 10^{-b(m_{max}-m_{min})}}, \quad m_{min} \leq m \leq m_{max} \quad (12)$$

Función de Densidad de Probabilidades:

$$f_M = \frac{b \ln(2.10) 10^{-b(m-m_{min})}}{1 - 10^{-b(m_{max}-m_{min})}}, \quad m_{min} \leq m \leq m_{max} \quad (13)$$

Un ejemplo de la diferencia entre el modelo de Gutenberg-Richter sin acotar y Acotado de iguales parámetros a y b , se presenta en la Figura 4.

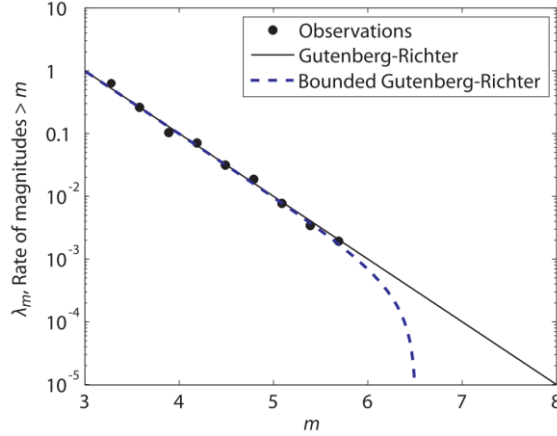


Figura 4. Comparación entre el modelo de Gutenberg-Richter y el modelo de Gutenberg Richter Acotado (*Bounded Gutenberg-Richter*), junto con observaciones de una fuente sísmica. (Baker, 2013).

Finalmente, el modelo de Escenario Característico se fundamenta en la Teoría Elástica de Placas (Hagiwara, 1974; Rikitake, 1974; Utsu, 1972), la cual indica que las placas acumulan energía por deformación elástica desde la última activación, hasta alcanzar la energía necesaria para volver a activarse. De esta manera, se considera que ciertas fuentes sísmicas se activan con una tasa de recurrencia media para un rango determinado de magnitudes (Schwartz & Coppersmith, 1984) (ver Ecuaciones 14 a 16).

Modelo:

$$\lambda_m = \lambda, \quad m_{min} \leq m \leq m_{max} \quad (14)$$

Función de Distribución Acumulada:

$$F_M = \frac{m - m_{min}}{m_{max} - m_{min}}, \quad m_{min} \leq m \leq m_{max} \quad (15)$$

Función de Densidad de Probabilidades:

$$f_M = \frac{1}{m_{max} - m_{min}}, \quad m_{min} \leq m \leq m_{max} \quad (16)$$

Donde λ corresponde a la tasa anual de activación de la fuente sísmica, cuyo valor se considera constante.

2.3.2 Función de Probabilidad de la Distancia

No existe una expresión o modelo matemático general que permita establecer la función de probabilidades de la distancia de un sitio a la fuente sísmica. Esto se debe a que dicha función depende de la geometría particular de cada fuente sísmica, su capacidad sismogénica y si la distancia se mide al hipocentro, la ruptura o la proyección en superficie de esta.

Para ilustrar cómo cada uno de los factores mencionados en el párrafo anterior influye en la función de probabilidad de la distancia, y además explicar cómo se obtiene dicha función, se presentan en la Figura

5 varios casos donde se muestran el sitio de estudio con marcadores rojos, las fallas activas con líneas punteadas negras y las rupturas con marcas azules.

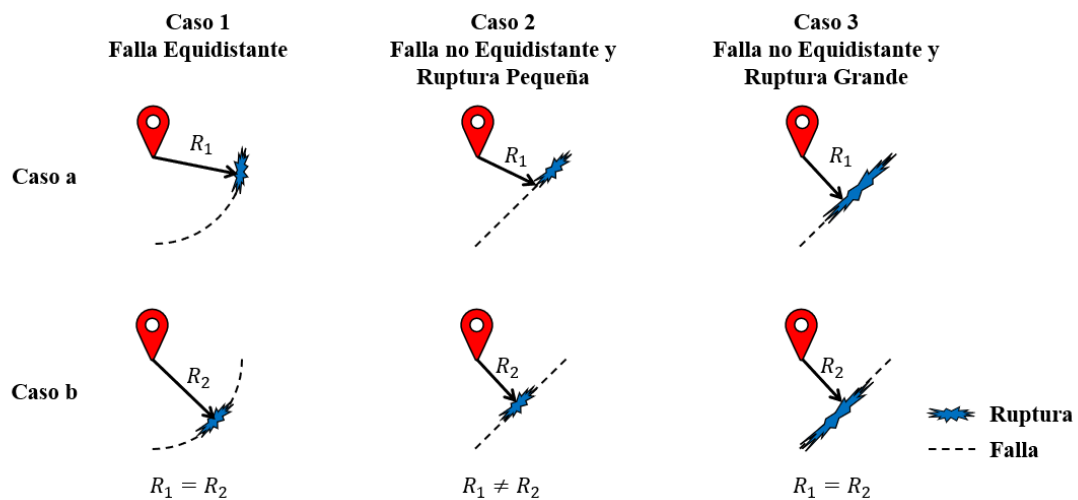


Figura 5. Casos ilustrativos de la influencia de la geometría de la falla y del largo de la ruptura, o bien la magnitud, en la función de densidad de probabilidades de la distancia entre el sitio y la ruptura.

Si se desea medir la mínima distancia desde el sitio de estudio a la ruptura, en el caso 1, la distancia R_1 es igual a R_2 , y lo será sin importar la ubicación de la ruptura sobre la traza de la falla o el tamaño de la ruptura. Sin embargo, esto no se cumple en los casos donde la traza de la falla no es equidistante al sitio de estudio, como el segundo y tercer caso de la Figura 5. En el caso 2, donde se presenta una ruptura pequeña (asociada a magnitudes de momento menores), la distancia dependerá de la ubicación de la ruptura sobre la falla, por lo que R_1 no es igual a R_2 . Por el contrario, si se considera una ruptura suficientemente grande y, por lo tanto, una magnitud grande, la distancia volverá a ser constante, tal como se aprecia en los casos 3.a y 3.b. Por lo tanto, distintas geometrías y magnitudes producirán funciones de probabilidad de distancia diferentes, lo que dificulta la formulación de una expresión o modelo matemático general para la función de probabilidad de la distancia de un sitio a la fuente.

Usualmente, el cálculo de esta función se hace de manera computacional puesto que, al tener fallas geológicas irregulares y un amplio rango de magnitudes, el resultado se vuelve complejo de expresar como una función matemática.

2.3.3 Cálculo de la Amenaza Sísmica en el PSHA

Después de obtener las funciones de densidad de probabilidades de la magnitud y de la distancia dada una magnitud para cada fuente que pueda afectar al sitio de estudio, se utiliza el Teorema de Probabilidades Totales para integrar toda la información. De esta manera, el análisis probabilístico de la amenaza sísmica busca determinar la tasa de excedencia anual de una o más intensidades.

Para esto, en primer lugar, se debe identificar una fuente sísmica i y se ajusta un modelo de recurrencia considerando el rango de magnitudes que es capaz de generar, $[m_{min_i} - m_{max_i}]$. Luego, se selecciona una magnitud m dentro del rango, y se calcula la función de densidad de probabilidades de la distancia, la cual tendrá un rango entre 0 y r_{max_i} . A continuación, se elige un valor de distancia r dentro del

rango de la función de densidad de probabilidades y se determina la probabilidad de excedencia de un nivel de intensidad IM dado el par m y r . El procedimiento mencionado se ilustra en la Figura 6(a).

Para determinar la probabilidad de excedencia de un nivel de intensidad IM utiliza una función de distribución normal estándar, de la Ecuación 17:

$$P(IM > im|M_i = m, R_i = r) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln IM - \ln \overline{IM}}{\sigma_{\ln IM}}\right) \quad (17)$$

Donde Φ es la función de distribución normal estándar y $\ln \overline{IM}$ y $\sigma_{\ln IM}$ se calculan usando los valores de m y r en la GMM (Ecuación 1) que escoja el autor.

El siguiente paso es seleccionar nuevos valores de r en secuencia, tal como lo ilustra la Figura 6(b), para cubrir todo el rango de su función de densidad de probabilidades. Luego, se aplica el Teorema de Probabilidades Totales, sumando los productos de la probabilidad de excedencia (área azul bajo la curva del gráfico IM respecto a R en las Figuras 6(a) a 6(d)) por las funciones de densidad evaluadas en m y r respectivamente.

Una vez cubierto todo el rango de distancias de la función de densidad de probabilidades de distancia dada una magnitud, se elige un nuevo valor de magnitud m , siguiendo el mismo procedimiento de la Figura 6(c). Se repiten los pasos (a) a (c) de la Figura 6 hasta cubrir todo el rango de magnitudes que es capaz de generar la falla. Finalmente, se multiplica el resultado por la tasa de activación de la fuente sísmica (Figura 6(d)), la cual corresponde a tasa de recurrencia de m_{min_i} y se procede con la siguiente fuente sísmica, sumando sus resultados a los obtenidos de las fallas anteriores.

Este procedimiento se resume en la Ecuación 18:

$$\lambda(IM > im) = \sum_{i=1}^{N_{Fuentes}} \lambda_{min_i} \int_{m_{min_i}}^{m_{max_i}} \int_0^{r_{max_i}} P(IM > im|M_i = m, R_i = r) f_{R_i|M_i}(r|m) f_{M_i}(m) dr dm \quad (18)$$

Donde $f_{R_i|M_i}$ y f_{M_i} corresponden a las funciones de densidad de la fuente i , λ_{min_i} es la tasa de recurrencia asociada a la magnitud mínima en la fuente i y $P(IM > im|M_i = m, R_i = r)$ es la probabilidad de exceder la intensidad im , calculada con la Ecuación 17, dada una magnitud M_i y una distancia R_i .

El análisis probabilístico de la amenaza sísmica permite obtener la curva de amenaza sísmica de un sitio específico, lo que se logra siguiendo el mismo procedimiento descrito en los párrafos anteriores, pero para varios niveles de intensidad. La curva resultante permite conocer el nivel de intensidad asociado a una cierta tasa de excedencia anual y, a través de la Ecuación 19, se puede estimar la probabilidad de ocurrencia en un periodo de años determinado.

$$PoE = 1 - e^{-\lambda_{IM} T} \quad (19)$$

Donde PoE es la probabilidad de exceder un nivel de intensidad IM con tasa de excedencia anual, λ_{IM} , en un periodo de tiempo, T . Es de suma importancia mencionar que los resultados de tasa de excedencia anual de cada fuente por separado se pueden sumar para obtener el resultado de tasa de excedencia anual

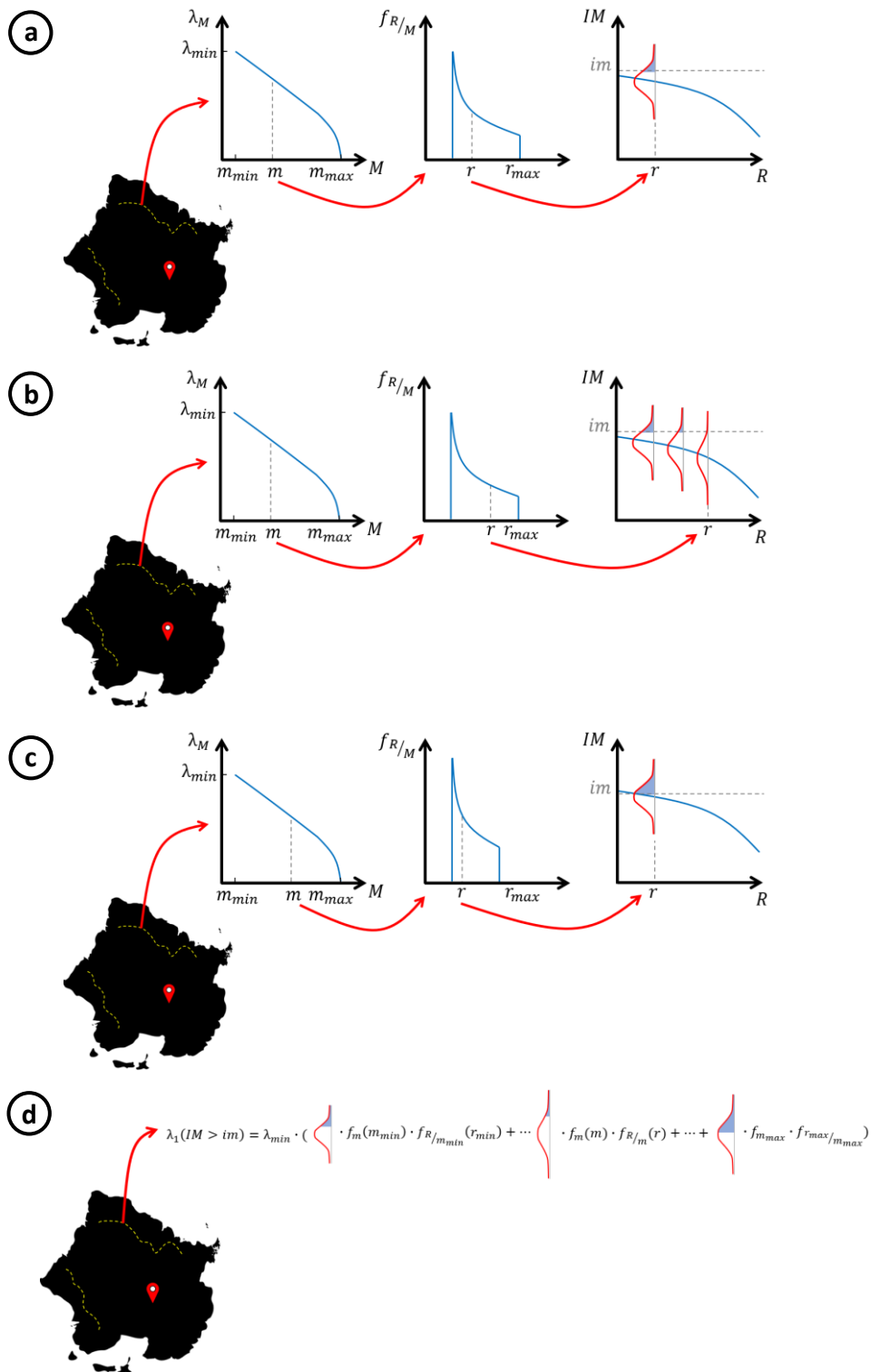


Figura 6. Esquema ilustrativo del procedimiento del PSHA para el cálculo de la amenaza sísmica. a. Selección de una magnitud alcanzable por la fuente y una distancia del sitio a la ruptura que cause esa magnitud, para estimar la probabilidad de excedencia de un nivel de intensidad. b. Repetición del paso anterior hasta cubrir todas las posibles distancias de la magnitud seleccionada. c. Selección de una nueva magnitud hasta cubrir todas las magnitudes que puede generar la fuente sísmica. d. Suma del producto de la probabilidad de excedencia por las funciones probabilidad de la magnitud y distancia asociada.

de múltiples fuentes en simultáneo. Sin embargo, los resultados de probabilidad de excedencia de cada

fuentes no se pueden sumar para obtener la probabilidad de excedencia de múltiples fuentes en simultáneo. Para ello, se debe usar la Ecuación 19 con la tasa de excedencia anual de múltiples fuentes en simultáneo.

El análisis probabilístico de la amenaza sísmica permite calcular el espectro de amenaza del sitio asociado a una probabilidad de excedencia fija, denominado Espectro de Amenaza Uniforme. Además, calculando el espectro de amenaza uniforme, se pueden generar mapas de amenaza sísmica. Estos pueden estar sujetos a un nivel de amenaza fijo, donde el mapa muestra curvas de *IM* con igual probabilidad de excedencia, o a un nivel de intensidad fijo, donde el mapa presenta curvas de probabilidades de excedencia para un mismo nivel de intensidad.

2.4 Caracterización de la Amenaza Sísmica en la Normativa Chilena

En Chile, el diseño sísmico de estructuras se rige principalmente por la Norma NCh433, la cual fue oficializada el año 1996 y modificada el año 2012 luego del terremoto de Maule M_w 8.8, 2010. Esta norma establece espectros de diseño cuyos valores dependen del tipo de suelo donde se ubica la estructura, su uso y la zona sísmica en la que se encuentra. La Figura 7, a su izquierda, muestra la clasificación de zonas sísmicas en Chile. Esta clasificación de zonas sísmicas se aplica en todas las otras normas de diseño sísmico o similares; NCh2369.Of2003, para instalaciones industriales, NCh2745.Of2003, para aisladores sísmicos, NCh3411.Of2017, para disipadores sísmicos, NCh3357.Of2015, para sistemas no estructurales y en el diseño de puentes del Volumen N°3 del Manual de Carreteras.



Figura 7. Izquierda: Zonas sísmicas definida por la norma NCh433.Of1996 para el cálculo del espectro de diseño y utilizado en toda la normativa asociada a diseño sísmico en Chile (Barrios, 2022). Derecha: Placas tectónicas que interactúan en el territorio de Chile.

En la Figura 7, se puede observar que las zonas sísmicas en el norte, centro y sur del país son paralelas a las fosas de subducción de la placa de Nazca y Antártica bajo la placa Sudamericana, mientras que en la zona austral es paralela al límite de la placa de Scotia con la placa Sudamericana, llamada Falla de Magallanes Fagnano. Por lo tanto, se puede inferir que el espectro de diseño se relaciona directamente con la distancia del sitio a la zona de interacción de placas. En el caso de la interacción entre la placa de Nazca y Sudamericana, en esta zona se generan principalmente eventos interplaca.

Sin embargo, la norma NCh433.Of1996 no menciona un procedimiento de cómo incluir posibles fallas corticales en el espectro de diseño. Por su parte, ciertas normas como la NCh2475.Of2003 indican que “*Los espectros de movimiento del suelo específicos a un lugar y correspondiente al sismo de diseño y al sismo máximo posible se deben utilizar para el diseño y análisis de todas las estructuras aisladas, cuando... La estructura está ubicada a menos de 10 km de una falla activa y capaz.*” (Instituto Nacional de Normalización, 2003). La distancia de 10 [km] proviene de la norma ASCE 7 (ASCE, 2005), en la que se define dicha distancia para fallas con potencial sismogénico superior a M_w 6 y de 15 [km] si puede generar eventos superiores a M_w 7. Por una parte, la norma generaliza todas las fallas a una distancia de 10 [km] y, por otra, no especifica qué procedimiento seguir para determinar su amenaza sísmica.

3 Metodología

3.1 Modelación de la Falla San Ramón

3.1.1 Geometría

Para modelar la geometría de la Falla San Ramón, se utiliza la información disponible en la literatura. Según Ammirati et al. (2019), la traza de la falla se extiende aproximadamente 30 [km], pero detalla que existe la posibilidad de que se extienda 20 [km] adicionales hacia el sur de Santiago. El modelo de la Falla San Ramón, mostrado en la Figura 8, incorpora ambas longitudes posibles y considera un ancho de la falla de 20 [km] (Ammirati et al., 2019) en el sentido del manteo, cuyo valor se asigna como 40° hacia el este (Pérez et al., 2014).

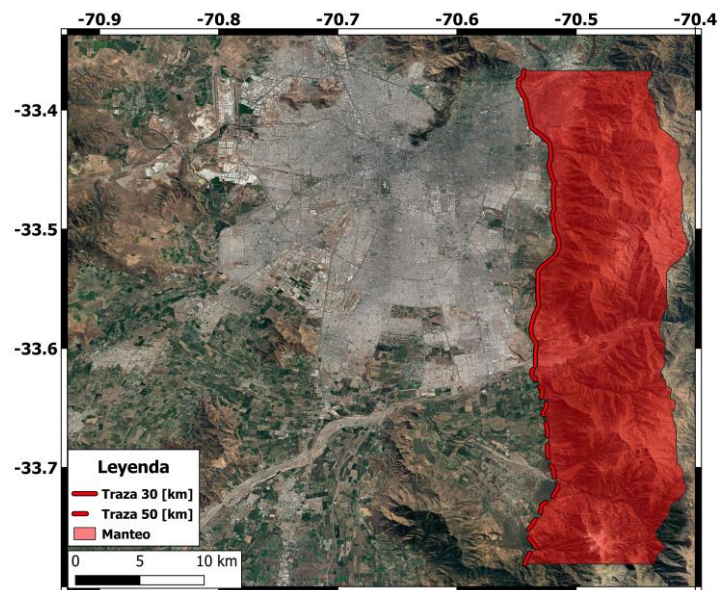


Figura 8. Traza de la Falla San Ramón de 30 [km] (continua) y 50 [km] (punteada) propuesta por Ammirati et al. (2019).

3.1.2 Modelo para Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica de la Falla San Ramón

Como se menciona en el Marco Teórico, el enfoque determinístico considera el peor escenario posible de una fuente sísmica. En ese contexto, se asume que la falla cuenta con una extensión de 50 [km].

Se emplearon tanto las ecuaciones de magnitud de momento (Ecuaciones 2 y 3) como las relaciones de Wells & Coppersmith (1994) (Ecuaciones 4 y 5) para estimar la magnitud máxima que puede generar la Falla San Ramón. Considerando un ancho de 20 [km] y un desplazamiento esperado de 4.8 [m] (Vargas et al., 2014), se obtiene una magnitud de momento de M_w 7.44. Utilizando las ecuaciones 4 se tiene una magnitud esperada de M_w 7.07, y, mediante la ecuación 5, M_w 7.35, considerando la magnitud media más una desviación estándar. De esta manera, se determina que la magnitud de momento máxima que puede generar la Falla San Ramón es de $M_w \sim 7.4$, no obstante, para no subestimar la magnitud y de acuerdo con Ammirati et al. (2019), se escoge como M_w 7.5.

3.1.3 Modelo para Análisis Probabilístico de la Amenaza Sísmica de la Falla San Ramón

Bajo un enfoque probabilístico, el modelo de la falla debe incorporar todos los eventos posibles y, con ello, la incertidumbre epistémica. Por esta razón, se considera tanto la posibilidad de que la traza tenga 30 [km] como 50 [km] de longitud. La magnitud máxima que puede generar la falla se estima a partir de las ecuaciones de momento sísmico (ecuaciones 2 y 3) y, a su vez, con la relación longitud-magnitud de (Wells & Coppersmith (1994) (ecuación 4). En el caso del modelo con traza de longitud de 50 [km], se estima una magnitud de momento de M_w 7.4 con ambas ecuaciones, mientras que, al considerar 30 [km], la magnitud de momento calculada según el momento sísmico es de M_w 7.29, y de M_w 7.08 según la relación entre la longitud y la magnitud considerando una desviación estándar alejada de la media. En consecuencia, se divide el modelo de 30 [km] de longitud en dos submodelos, uno con magnitud máxima de M_w 7.3 y otro de M_w 7.1.

Se estima el modelo de recurrencia de la Falla San Ramón como un modelo de evento característico, con magnitud mínima de M_w 6.7. Según Vargas et al. (2014), la recurrencia de la falla es de $9,000 \pm 500$ años, determinada por medio de la datación de dos eventos en los últimos 17,000 años. Para tomar en cuenta la incertidumbre epistémica, se consideran tres posibles valores de recurrencia en el modelo; 8,500, 9,000 y 9,500 años.

Finalmente, a cada submodelo se le asigna un peso para realizar una ponderación del resultado final. Se considera mayor peso para el modelo de longitud de 30 [km], ya que la longitud de 50 [km] aún no ha sido comprobada (Ammirati et al., 2019). A cada magnitud máxima del modelo de 30 [km] de longitud se le asigna igual peso, mientras que a la recurrencia media estimada por Vargas et al. (2014) se le asigna un 0.5 y a los valores extremos un 0.25 a cada uno. La Figura 9 presenta el árbol lógico de los modelos junto con los pesos asignados.

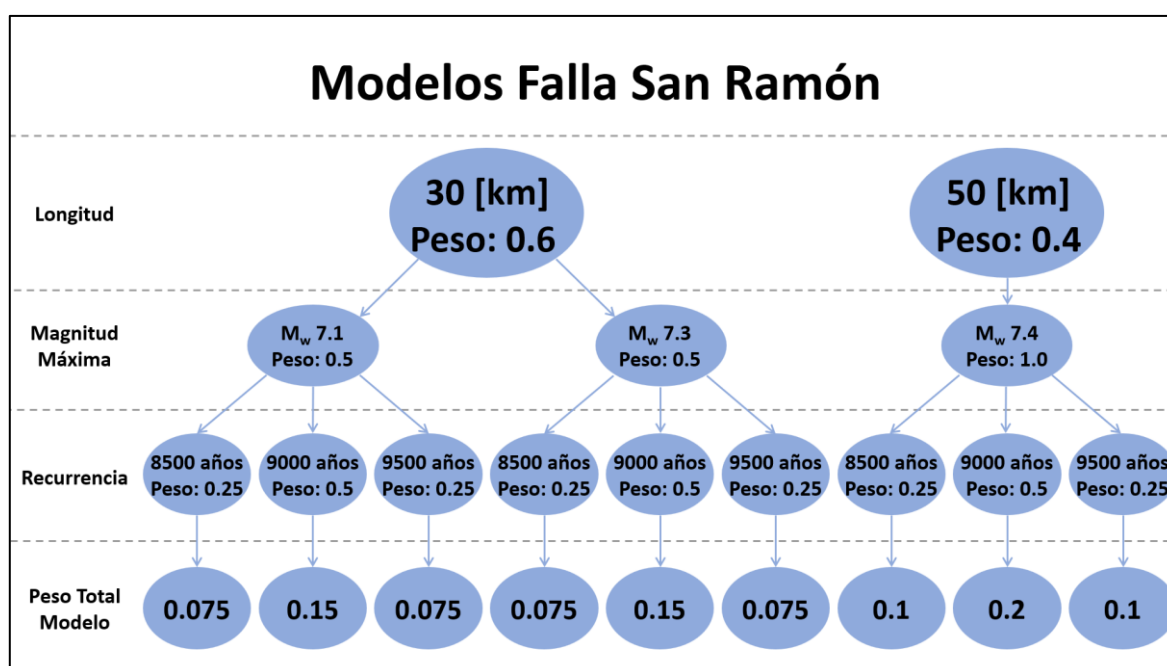


Figura 9. Árbol lógico de modelos de la Falla San Ramón para el Análisis Probabilístico de la Amenaza Sísmica.

3.2 Modelación de Eventos Interplaca e Intraplaca

La geometría de la zona de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana se obtiene a partir del modelo *Slab2* (Hayes et al., 2018), el cual contiene datos de latitud, longitud y profundidad la placa subducida. Mientras que, para la recurrencia, se utilizan las zonas sísmicas propuestas por Poulos et al. (2019). Como resultado, la modelación de la subducción consta de 3 zonas interplaca y 4 zonas intraplaca, las que se aprecian en la Figura 10(a) y 10(b). Además, los parámetros del modelo de recurrencia de cada zona se presentan en la Tabla 1.

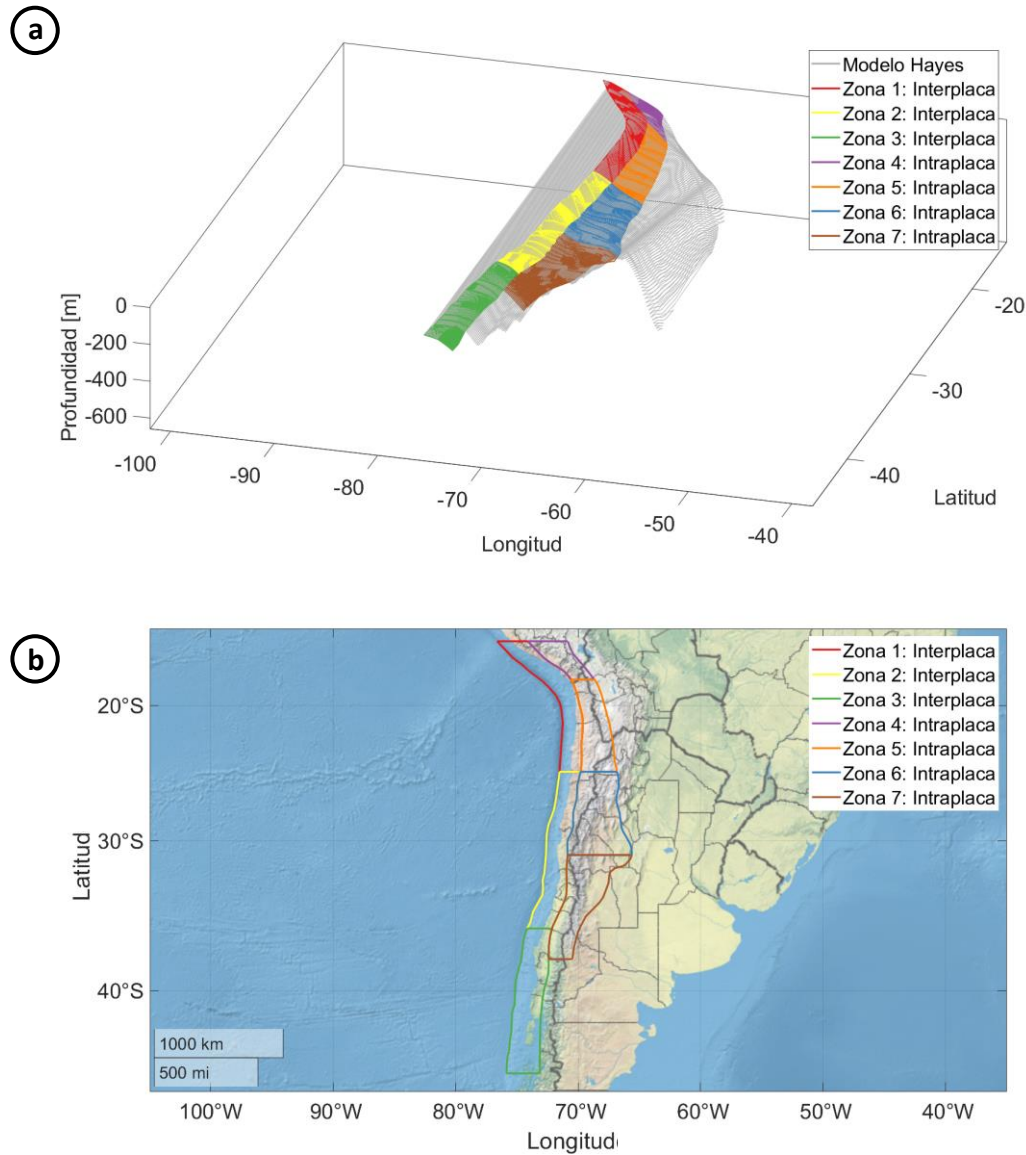


Figura 10. a. Modelo de la geometría de la subducción de la placa de Nazca obtenida a partir del modelo *Slab2* (Hayes et al., 2018), junto con el sombreado de las zonas definidas por Poulos et al. (2019). b. Vista geográfica de las zonas de Poulos et al. (2019), divididas en 3 zonas interplaca y 4 zonas intraplaca.

Tabla 1. Parámetros de los modelos de recurrencia utilizados para las zonas interplaca e intraplaca de la subducción de la placa de Nazca (Poulos et al., 2019).

Zona (Tipo)	a	b	Magnitud Máxima
1 (Interplaca)	5.15	0.87	9.2
2 (Interplaca)	5.36	0.88	9.3
3 (Interplaca)	4.26	0.77	9.6
4 (Intraplaca)	5.11	0.90	8.6
5 (Intraplaca)	6.37	1.04	8.4
6 (Intraplaca)	6.12	1.11	8.4
7 (Intraplaca)	5.32	0.98	8.5

3.3 Caracterización de sitios en Zona de Estudio

La zona de estudio se define de acuerdo con la investigación de Acevedo (2021), sintetizada en Bustos et al. (2023), donde se estimó la velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m], V_{s30} , y periodo fundamental del suelo, T_s , en sitios que abarcan las longitudes entre 70.50°W y 70.96°W y latitudes entre 33.33°S y 33.72°S (ver Figura 11).

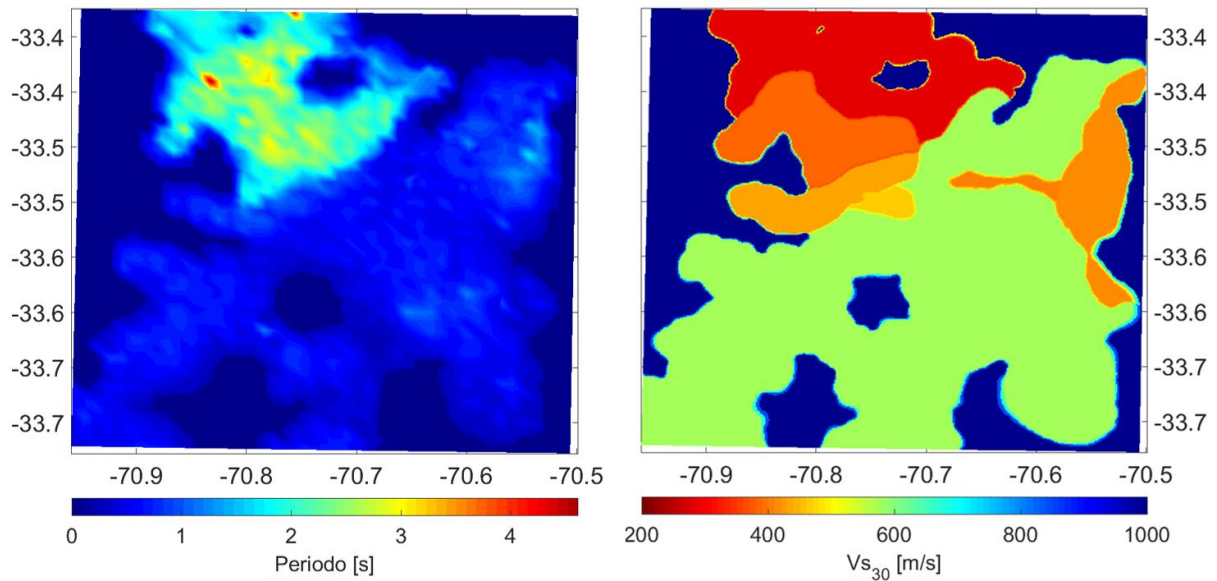


Figura 11. Izquierda: Mapa de periodos del suelo, T_s^* , en la cuenca de Santiago. Derecha: Mapa de velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m], V_{s30} , en la cuenca de Santiago.

No obstante, debido a la alta demanda computacional, se emplearon 46,631 sitios interpolados en la zona de estudio. Para esto, se descartan sitios de manera alternada en filas y columnas como se aprecia en la Figura 12. El espaciamiento promedio entre sitios aledaños es de 0.2 [km].

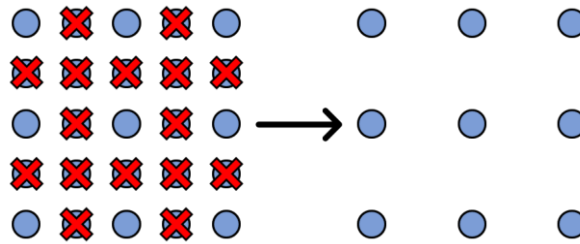


Figura 12. Método utilizado para acotar la cantidad de sitios de estudio para la determinación de mapas de amenaza sísmica.

3.4 Análisis de la Amenaza Sísmica

3.4.1 Selección de Modelos de Movimiento Fuerte

En el marco del análisis de amenaza sísmica, la selección de los modelos de movimiento fuerte (GMM) es un elemento fundamental. En este sentido, se siguen las recomendaciones propuestas por Bommer et al. (2010) para descartar modelos de movimiento fuerte de fallas corticales. Sin embargo, no se proporcionan recomendaciones para descartar modelos asociados a eventos de subducción, puesto que a la fecha de publicación había pocos modelos disponibles (Bommer et al., 2010).

3.4.1.1 Modelos de Movimiento Fuerte para Fallas Corticales

Se escogen los modelos de movimiento fuerte ASB14 (Akkar et al., 2014) y BSSA14 (Boore et al., 2014), con un peso de 0.5 cada una, para estimar la amenaza de la Falla San Ramón. Ambas ecuaciones corresponden a actualizaciones que cumplen con los criterios establecidos por Bommer et al. (2010).

La GMM ASB14 es aplicable a magnitudes de momento entre $4 < M_w < 8$ y profundidades focales menores a 30 [km]. Esto se cumple en la Falla San Ramón, que cuenta con una magnitud máxima de M_w 7.5 y un ancho de 20 [km]. Si bien esta GMM fue desarrollada a partir de eventos en el Medio Oriente y el sur de Europa, se ha seleccionado previamente para estudios de amenaza en Sudamérica (García et al., 2017).

Por su parte, BSSA14 es aplicable a un rango de magnitudes aún mayor, $3.5 < M_w < 8.5$, una distancia máxima del sitio a la fuente de 400 [km] y un rango de V_{s30} de $150 < V_{s30} < 1500 \left[\frac{m}{s} \right]$, por lo que también se cumplen los criterios de Bommer et al. (2010) para su uso.

3.4.1.2 Modelos de Movimiento Fuerte para eventos de Subducción

Si bien Bommer et al. (2010) no entrega criterios para descartar modelos de movimiento fuerte para eventos de subducción, sí ofrece recomendaciones para seleccionar GMM para eventos de cualquier naturaleza. Por consiguiente, se seleccionan las ecuaciones de AG20 (Abrahamson & Gulerce, 2022), Montalva17 (Montalva et al., 2017) e Idini17 (Idini et al., 2017).

Las tres ecuaciones seleccionadas cuentan con registros de Chile. En particular, tanto Montalva17 como Idini17 cuentan únicamente con registros del país, por lo que tienen menor incertidumbre al aplicarse en la zona de estudio.

La ecuación de AG20 cuenta con 660 registros de 51 eventos sísmicos en Sudamérica. Tiene una magnitud máxima de aplicabilidad de M_w 9.5 y una distancia máxima entre el sitio y la fuente de 500 [km]. De esta manera, las zonas 1 y 2 cumplen con los requisitos para ser utilizadas (ver Tabla 1).

El modelo de Montalva17 está generado a partir de 3774 registros de 473 eventos ocurridos en Chile. Se establece una magnitud máxima de aplicabilidad de M_w 9.0 y una distancia máxima de 1000 [km]. Sin embargo, se aclara que para eventos de entre $8.0 < M_w < 9.0$ es recomendable utilizar una distancia máxima de 300 [km].

La ecuación de Idini17 cuenta con 483 registros de 103 eventos sísmicos en Chile. Para eventos interplaca tiene una magnitud máxima de aplicabilidad de M_w 9.0 y un rango de distancias del sitio a la fuente de 30 a 400 [km]. Para eventos intraplaca el límite de magnitud de momento es de M_w 8.0 y el rango de distancias es de 60 a 400 [km]. Al utilizar magnitudes mayores a la máxima establecida para eventos intraplaca, esta GMPE incurre en una considerable sobrestimación de la intensidad, por lo que no se considera para este tipo de eventos. Además, esta ecuación requiere como parámetro de entrada el tipo de suelo clasificado según el periodo del suelo y su V_{s30} . La Figura 13 presenta la clasificación del suelo siguiendo los criterios de Idini et al. (2017) a partir de los valores estimados por Acevedo (2021) en la cuenca de Santiago (ver Figura 11).

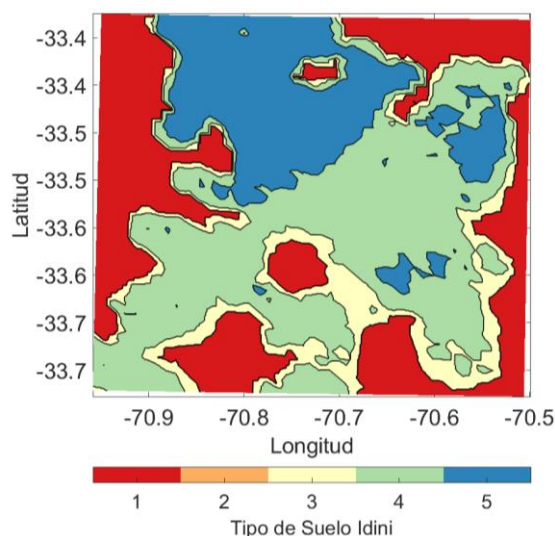


Figura 13. Mapa de clasificación del suelo según Idini et al. (2017) en la zona de estudio.

Las ecuaciones de Montalva et al. (2017) y de Idini et al. (2017) se utilizan para estimar la amenaza sísmica, a pesar de que tienen un límite de magnitud máxima de eventos interplaca menor al de las zonas de Poulos et al. (2019), ya que se consideran confiables al utilizar una base de datos de registros con hipocentros cercanos a la zona de estudio.

La Tabla 2 presenta los modelos de movimiento fuerte seleccionados para cada tipo de eventos sísmico, junto con el peso asignado para la ponderación de los resultados.

Tabla 2. Modelos de movimiento fuerte seleccionados, junto con su peso de ponderación, para cada tipo de fuente sísmica.

Fallas Corticales		Interplaca		Intraplaca	
GMPE	Peso	GMPE	Peso	GMPE	Peso
ASB14	0.5	AG20	0.3333	AG20	0.5
BSSA14	0.5	Montalva17	0.3334	Montalva17	0.5
		Idini17	0.3333		

Todos los modelos de movimiento fuerte seleccionados para esta investigación, tanto para eventos interplaca, intraplaca como de fallas corticales, entregan aceleraciones espectrales con fracción de amortiguamiento de 5%. Dado esto, los espectros de respuesta, espectros de amenaza uniforme y mapas de amenaza estarán asociados al valor de amortiguamiento mencionado.

3.4.2 Sitios de Estudio e Intensidades Consideradas

Con el propósito de generar espectros de amenaza, espectros de amenaza uniforme y curvas de amenaza para sitios específicos, se seleccionan dos puntos geográficos para realizar una comparación. El primer sitio se escoge de manera arbitraria en el centro de la ciudad, se ubica en las coordenadas 33.47°S 70.61°W, en la comuna de Ñuñoa, a aproximadamente 8.5 [km] al oeste de la falla (Sitio 1). El segundo sitio se emplaza directamente sobre la Falla San Ramón (Sitio 2), en las coordenadas 33.47°S 70.52°W. Los parámetros del suelo de ambos sitios de estudio se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del suelo en los sitios seleccionados para el cálculo de espectros y curvas de amenaza.

Sitio	$V_{s30} \left[\frac{m}{s} \right]$	$T^* [s]$	Tipo de Suelo Idini17
1 (Ñuñoa)	579	0.77	IV
2 (FSR)	415	0.39	III

Los estudios de amenaza realizados se enmarcan en estimar aceleraciones espectrales, $Sa(T)$, en un rango de periodos, T , de 0 a 3 [s]. Sin embargo, los resultados presentados correspondientes a una intensidad fija, tal como las curvas de amenaza o mapas de amenaza obtenidos bajo un enfoque determinístico, se obtienen para PGA , $Sa(0.3 [s])$, $Sa(1 [s])$ y $Sa(3 [s])$.

3.4.3 Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica

Como se menciona en la sección 4.1.2, el peor escenario posible de la Falla San Ramón se estima como una activación de magnitud de momento de M_w 7.5. Ahora bien, en cuanto a los eventos interplaca e intraplaca se consideran dos casos, primero se utiliza la magnitud máxima propuesta por Poulos et al. (2019) al frente de Santiago para eventos interplaca (zona 2 en Tabla 1) y bajo Santiago para eventos intraplaca (zona 7 en Tabla 1). Así las magnitudes consideradas son de M_w 9.3 y M_w 8.5 para inter e intraplaca, respectivamente. En el segundo caso se consideran magnitudes menores que cuenten con mayor recurrencia y, por lo tanto, probabilidad de ocurrencia. Para el evento interplaca se utiliza una magnitud de M_w 8.0, asociado a un periodo de retorno de ~50 años, mientras que en el caso del evento intraplaca, se

utiliza la magnitud asociada al terremoto de Chillán, 1939, M_s 7.8 (Campos & Kausel, 1990), lo que corresponde a M_w 7.8 según la Ecuación 7, de Scordilis (2006). Ambos eventos intraplaca se ubican en las coordenadas 33.51°S 70.67°W. La ubicación del epicentro de los eventos intraplaca, junto con las rupturas de los eventos interplaca se pueden apreciar en la Figura 14.

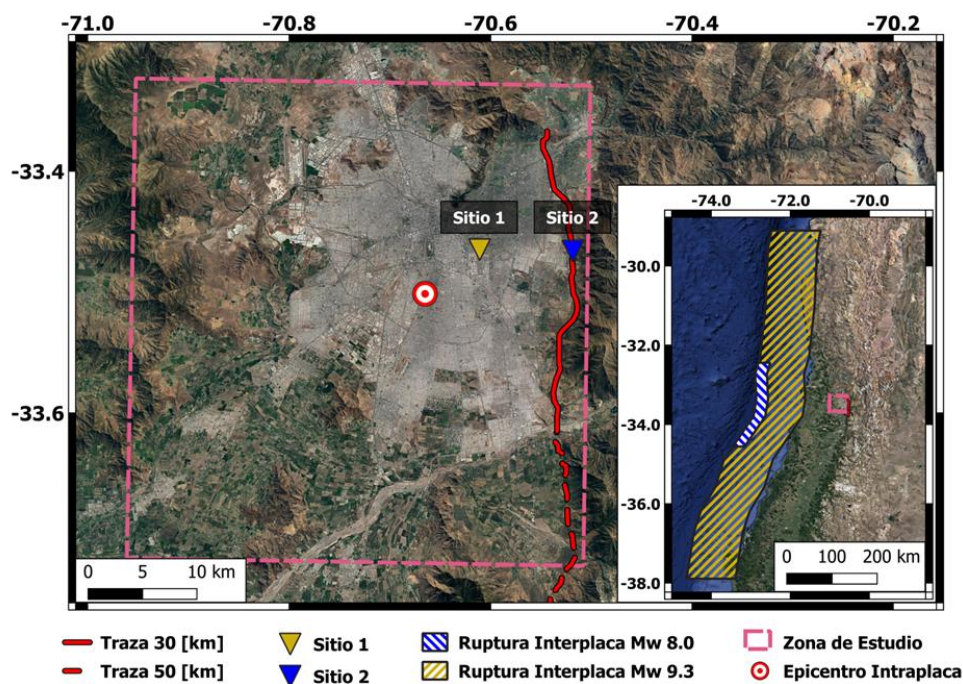


Figura 14. Izquierda: Mapa de la zona de estudio para el análisis de amenaza sísmica, los triángulos indican los sitios a los que se le estimarán los espectros y curvas de amenaza, la estrella representa la ubicación del epicentro de los eventos intraplaca del enfoque determinístico y la línea roja indica la traza de la Falla San Ramón de 30 [km] (continua) y 50 [km] (punteada). Derecha: Mapa donde se muestran las rupturas de los casos con M_w 9.3 (amarillo) y M_w 8.0 (azul) de los eventos interplaca del enfoque determinístico.

3.4.4 Análisis Probabilístico de la Amenaza Sísmica

Para realizar el análisis probabilístico de la amenaza sísmica, se utiliza el software *OpenQuake* (Pagani et al., 2014), el cual entrega espectros de amenaza uniforme y curvas de amenaza sísmica para cada sitio. Fundamentalmente, el software realiza la simulación de cada ruptura posible dentro de la fuente sísmica, generando la función de densidad de probabilidades de la distancia.

En el caso de la Falla San Ramón, se ingresan los 9 modelos generados con su respectivo peso (ver Figura 9). Además, se considera un mallado de la ruptura de 1×1 [km²] y un tiempo de interés de 50 años. Por su parte, la subducción se modela por zonas, generando un total de 7 modelos independientes, con las leyes de recurrencia de Poulos et al. (2019) y la geometría de Hayes et al. (2018). En este caso, al ser considerablemente de mayor tamaño que la Falla San Ramón, se utiliza un mallado de ruptura de 5×5 [km²]. Se consideró como distancia máxima sitio-ruptura 600 [km] para los eventos de subducción y 100 [km]

para la Falla San Ramón. Por otra parte, las funciones de densidad de probabilidades de los modelos de movimiento fuerte fueron truncadas a 6 veces la desviación estándar. Con el fin de generar mapas de amenaza para niveles de intensidad fijos, la Tabla 4 presenta los valores de cada intensidad escogidos.

Tabla 4. Niveles de intensidad de estudio para conformación de mapas de amenaza para Análisis Probabilístico de la Amenaza Sísmica.

<i>PGA</i> [<i>g</i>]	<i>Sa</i> (0.3) [<i>g</i>]	<i>Sa</i> (1.0) [<i>g</i>]	<i>Sa</i> (3.0) [<i>g</i>]
0.5	0.5	0.5	0.05
1.0	1.0	1.0	0.1
1.5	2.0	2.0	0.5

4 Resultados

4.1 Resultados Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica (DSHA)

El análisis determinístico de la amenaza sísmica (DSHA), se realiza para dos magnitudes de los eventos asociados a la subducción de la placa de Nazca. El primer escenario corresponde al “peor escenario posible”, donde se utilizan las magnitudes máximas correspondientes a las recurrencias definidas para las zonas 2 y 7, para interplaca e intraplaca respectivamente, por Poulos et al. (2019). Mientras que el segundo escenario se escoge según un nivel su recurrencia, para el caso interplaca, y eventos históricos para intraplaca.

4.1.1 Espectros de Amenaza

La Figura 15 presenta los espectros de amenaza, asociados a la mediana de las ordenadas espectrales, de ambos sitios de estudio al considerar la magnitud máxima posible en los eventos interplaca (azul), M_w 9.3, intraplaca (verde), M_w 8.5, y en la Falla San Ramón (rojo), M_w 7.5.

A la izquierda de la figura se presentan los espectros generados en el sitio 1 de estudio (Ñuñoa). En ellos, se puede observar que para periodos menores a 1.0 [s] la intensidad causada por el evento intraplaca excede con holgura la intensidad que genera el evento de la Falla San Ramón y el evento interplaca. Sin embargo, para periodos mayores a 1.0 [s] la Falla San Ramón causa intensidades mayores que los peores escenarios posibles de eventos de subducción. Debido a esto se espera que exista una zona de predominio de la falla para periodos mayores a 1.0 [s] y que alcance al menos el sitio 1 de estudio.

Por su parte, a la derecha de la figura se exhiben los espectros generados en el sitio 2 de estudio (sobre la Falla San Ramón). Nuevamente, se aprecia que para periodos cortos el evento intraplaca genera mayor intensidad. No obstante, en este caso la Falla San Ramón predomina desde un periodo de 0.4 [s]. Dado esto, se espera que existan zonas de predominio de la falla, pero que no alcancen el sitio 1 de estudio al considerar periodos espectrales entre 0.4 y 1.0 [s] y que no existan para periodos menores a 0.4 [s].

Los espectros de amenaza obtenidos al considerar eventos con mayor tasa de recurrencia (interplaca M_w 8.0 e intraplaca M_w 7.8) se enseñan en la Figura 16. Al igual que en la Figura 15, se aprecia que no existen zonas de predominio de la Falla San Ramón para periodos cortos. Ahora bien, en este caso las zonas de predominio se generan a partir de un periodo espectral de 0.25 [s] y alcanzan el sitio 1 para periodos mayores a 0.5 [s]. En efecto, las Figuras 19 y 21 confirman la presencia y comportamiento de las zonas de predominio.

Los espectros de amenaza para el percentil 84 de la distribución de aceleraciones espectrales se presentan en los anexos en las Figuras A 1 y A 2. Las conclusiones descritas anteriormente se mantienen al analizar los espectros de amenaza para el percentil 84.

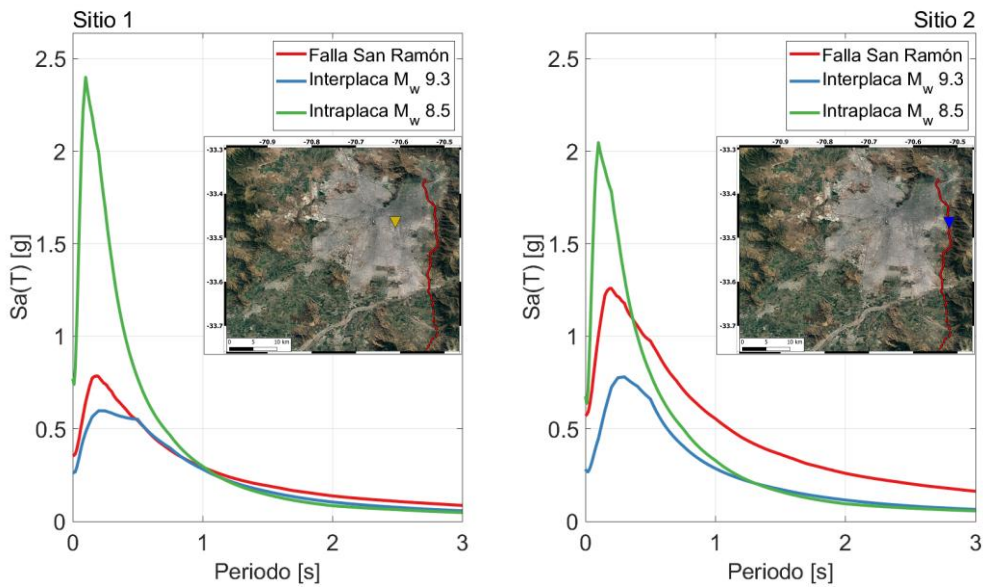


Figura 15. Espectros de amenaza obtenidos mediante un enfoque determinístico, para la mediana de la distribución de intensidades, considerando eventos de M_w 9.3 interplaca (azul), M_w 8.5 intraplaca (verde) y M_w 7.5 en la Falla San Ramón (rojo).

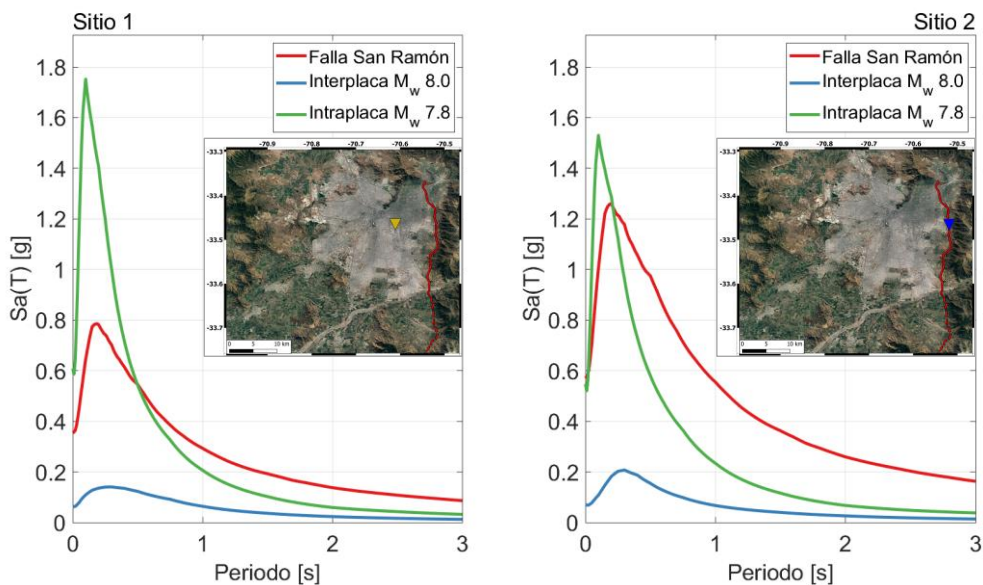


Figura 16. Espectros de amenaza obtenidos mediante un enfoque determinístico, para la mediana de la distribución de intensidades, considerando eventos de M_w 8.0 interplaca (azul), M_w 7.8 intraplaca (verde) y M_w 7.5 en la Falla San Ramón (rojo).

La Figura 17 presenta la envolvente de los espectros presentados en la Figura 15, así como la de los espectros de la Figura 16, junto con el espectro elástico de diseño de cada sitio de estudio. Los espectros de diseño fueron determinados según lo indicado por la norma NCh433.Of1996 considerando la clasificación de suelos del Decreto Supremo 61, según la velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m], V_{s30} (ver Tabla 2) y considerando un factor de importancia II. Como se puede apreciar, en ambos sitios de

estudio el espectro de diseño elástico es menor a la envolvente de los espectros obtenidos al considerar un evento interplaca de magnitud M_w 9.3, intraplaca de M_w 8.5 y un evento de M_w 7.5 en la Falla San Ramón. Lo mismo sucede en el sitio de estudio 2 al considerar magnitudes de M_w 7.5 en la Falla San Ramón, M_w 8.0 en el evento interplaca y M_w 7.8 en el intraplaca, y en el sitio 1 casi todo el rango de periodos estudiados. Además, se puede notar que, para periodos de vibración largos, el espectro elástico de diseño es excedido por el espectro de respuesta generado únicamente por la Falla San Ramón (i.e., periodos para los cuales la envolvente es la misma en ambos casos).

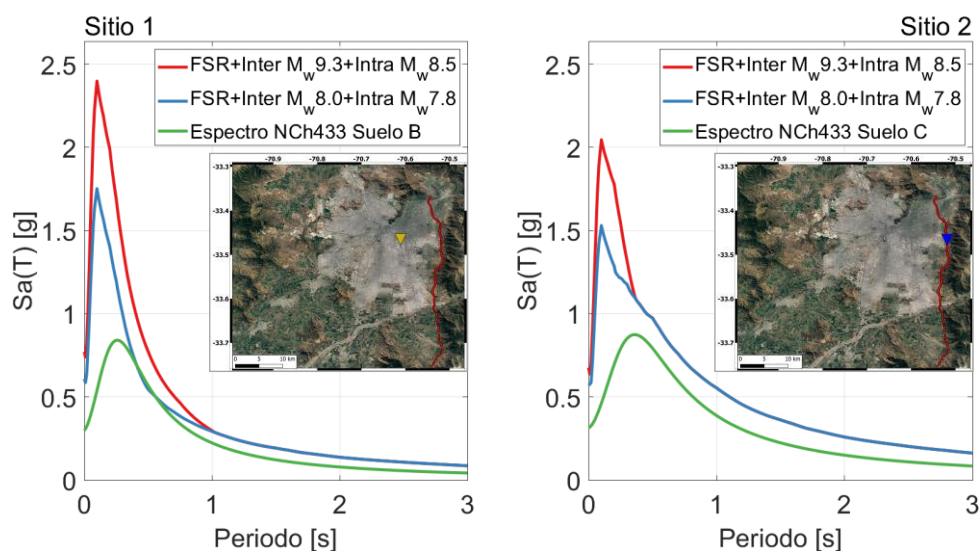


Figura 17. Envolventes de los espectros presentados en las Figuras 16 (rojo) y 17 (azul), junto con el espectro elástico de diseño según la norma NCh433.Of1996 y el Decreto Supremo 61 (verde).

En los anexos se presenta la Figura A 3 la cual muestra las envolventes para los espectros asociados al percentil 84 (ver Figuras A 1 y A 2 en anexos). En ellas se vuelve a apreciar que el espectro de diseño elástico de la norma NCh433.Of1996 es menor a las envolventes obtenidas para el caso de evento interplaca de M_w 9.3 e intraplaca de M_w 8.5 y para el caso de M_w 8.0 y M_w 7.8 interplaca e intraplaca respectivamente, ambos con un evento de M_w 7.5 en la Falla San Ramón.

4.1.2 Mapas de Amenaza Sísmica DSHA

Se estiman los valores esperados y el percentil 84 de la distribución de intensidades PGA , $Sa(0.3)$, $Sa(1.0)$ y $Sa(3.0)$ para todos los sitios de la zona de estudio. A partir de estos valores, se generan mapas de amenaza sísmica para activaciones de M_w 7.5 en la Falla San Ramón, M_w 8.5 y M_w 7.8 para el evento intraplaca y M_w 9.3 y M_w 8.0 interplaca frente a Santiago (ver Figura 14). De esta forma, se determinan mapas de la envolvente de cada intensidad para la subducción (considerando interplaca e intraplaca) y para la Falla San Ramón. Asimismo, se elaboran mapas de cociente entre la amenaza de la subducción y de la Falla San Ramón. En estos mapas, un valor mayor que 1 indica mayor amenaza de la Falla San Ramón, menor que 1 indica mayor amenaza de la subducción e igual a 1 representa el límite de la zona de predominio de la falla.

La Figura 18 presenta los mapas de amenaza de *PGA* para una activación de M_w 7.5 en la Falla San Ramón (arriba), envolvente de la subducción para M_w 8.5 intraplaca y M_w 9.3 interplaca (al centro) y cociente entre la falla y la subducción (abajo).

En la Figura 19 se exhiben los mapas obtenidos al considerar las magnitudes de M_w 7.8 y M_w 8.0 intraplaca e interplaca respectivamente, manteniendo la magnitud de M_w 7.5 en la Falla San Ramón. Mientras que las Figuras 20 y 21 presentan los mapas de amenaza al considerar las mismas magnitudes que las utilizadas en las Figuras 18 y 19 respectivamente, pero tomando en consideración $Sa(3.0)$ como intensidad de estudio.

El mapa de amenaza de *PGA* de la Falla San Ramón (ver Figura 18) presenta intensidades esperadas de hasta 0.5 [*g*] en los sitios cercanos a la falla, e incluso de 1.1 [*g*] para el percentil 84 (ver Figura A 8 en anexos). No obstante, tal como se aprecia en los espectros de amenaza, no se observa una zona de predominio de la Falla San Ramón. Así mismo, al considerar magnitudes menores en eventos de subducción (ver Figura 19), se advierte una zona de predominio de aproximadamente 5 [*km*] en las cercanías de la traza de la falla.

Al contrario del *PGA*, al considerar $Sa(3.0)$ como intensidad de estudio, se aprecian zonas de predominio tanto para las magnitudes máximas posibles como para las menores en la subducción (ver Figuras 20 y 21). En este caso, la Falla San Ramón alcanza aceleraciones esperadas de 0.16 [*g*] y 0.32 [*g*] para el percentil 84 (ver Figura A 14 en anexos). No obstante, en la Figura 20 se observa que el cociente entre la amenaza generada por Falla San Ramón y por la subducción alcanza valores de hasta 2.5, lo que quiere decir que la amenaza de la Falla San Ramón supera en un 150% a la de la subducción. Más aún, al realizar el análisis con menores magnitudes en interplaca e intraplaca, el cociente tiene un valor máximo de 4.0 y la zona de predominio de la Falla San Ramón cubre prácticamente la totalidad de Santiago, alcanzando una extensión de entre 30 a 40 [*km*] hacia el oeste de la traza.

En cuanto a los eventos de subducción, al utilizar *PGA* como intensidad de estudio (ver Figura 18), se observa que los mapas presentan curvas de igual nivel de intensidad en forma de anillos. Estos corresponden a puntos de igual distancia al hipocentro del evento intraplaca, por lo que se puede asumir que este evento controla la amenaza por sobre el interplaca.

Los mapas correspondientes a las intensidades $Sa(0.3)$ y $Sa(1.0)$ se presentan en la sección de anexos. En ellos se confirma que las zonas de predominio de la Falla San Ramón aumentan junto con el periodo de vibración considerado para la ordenada espectral. La zona de predominio para $Sa(0.3)$ alcanza aproximadamente 5 [*km*] hacia el oeste de la traza de la falla, mientras que para $Sa(1.0)$ la zona alcanza ~20 [*km*], ambas considerando los eventos intraplaca e interplaca de mayor recurrencia (i.e. M_w 7.8 y M_w 8.0 respectivamente).

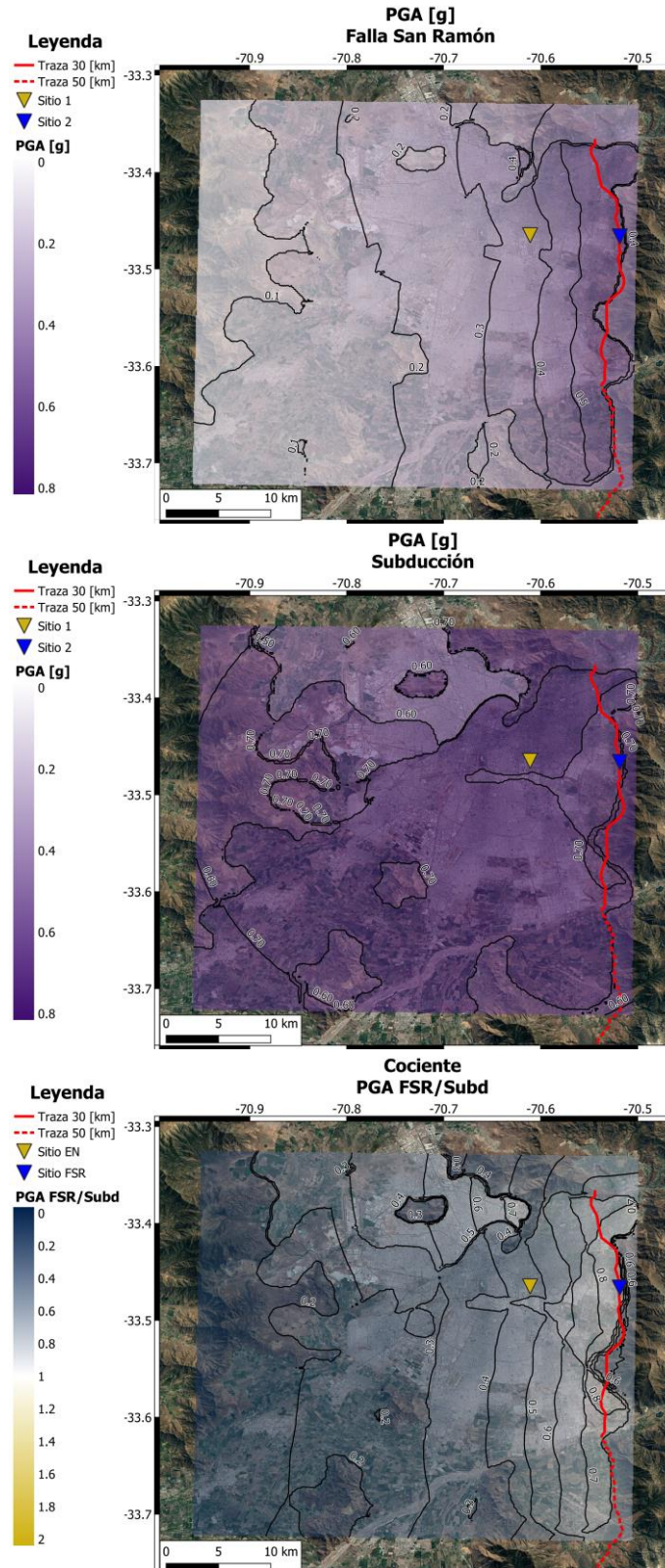


Figura 18. Mapas de amenaza de mediana de PGA obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 9.3$, e intraplaca $M_w 8.5$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

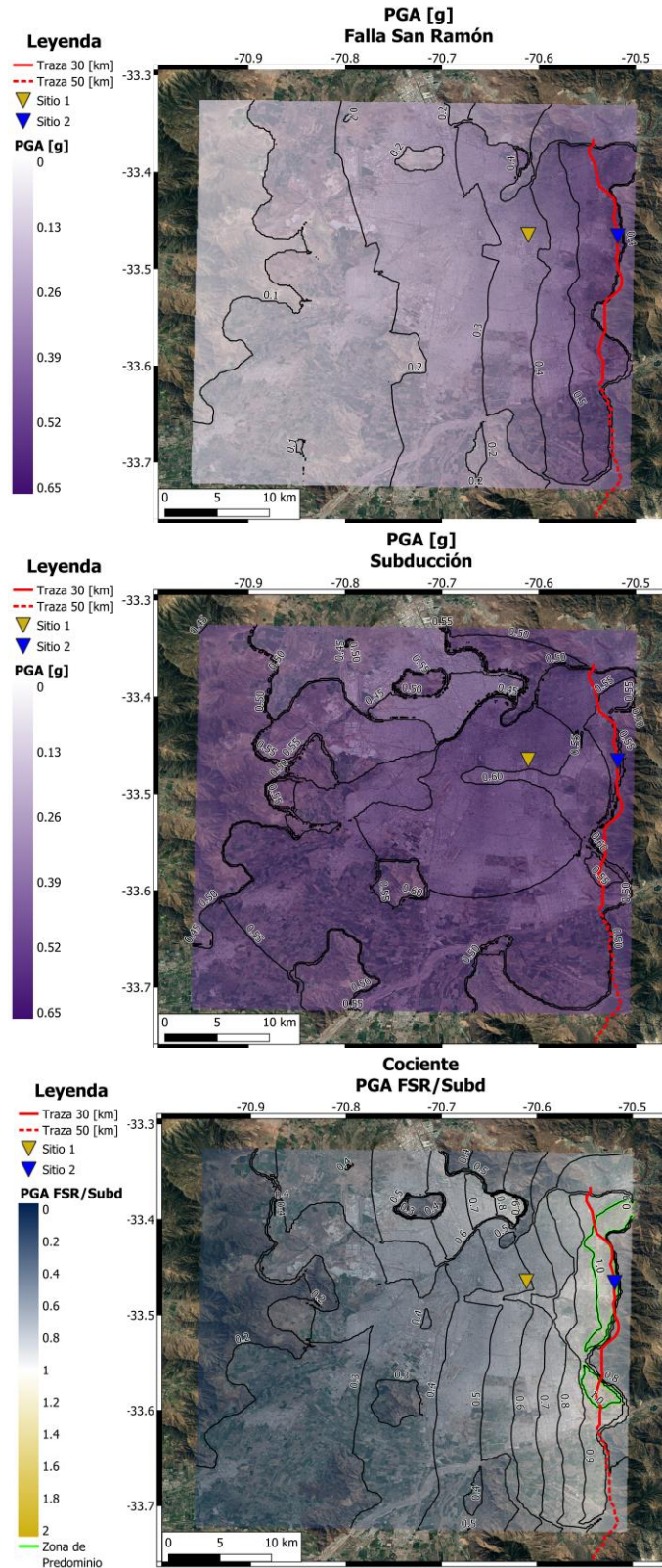


Figura 19. Mapas de amenaza de mediana de PGA obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 8.0$, e intraplaca $M_w 7.8$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

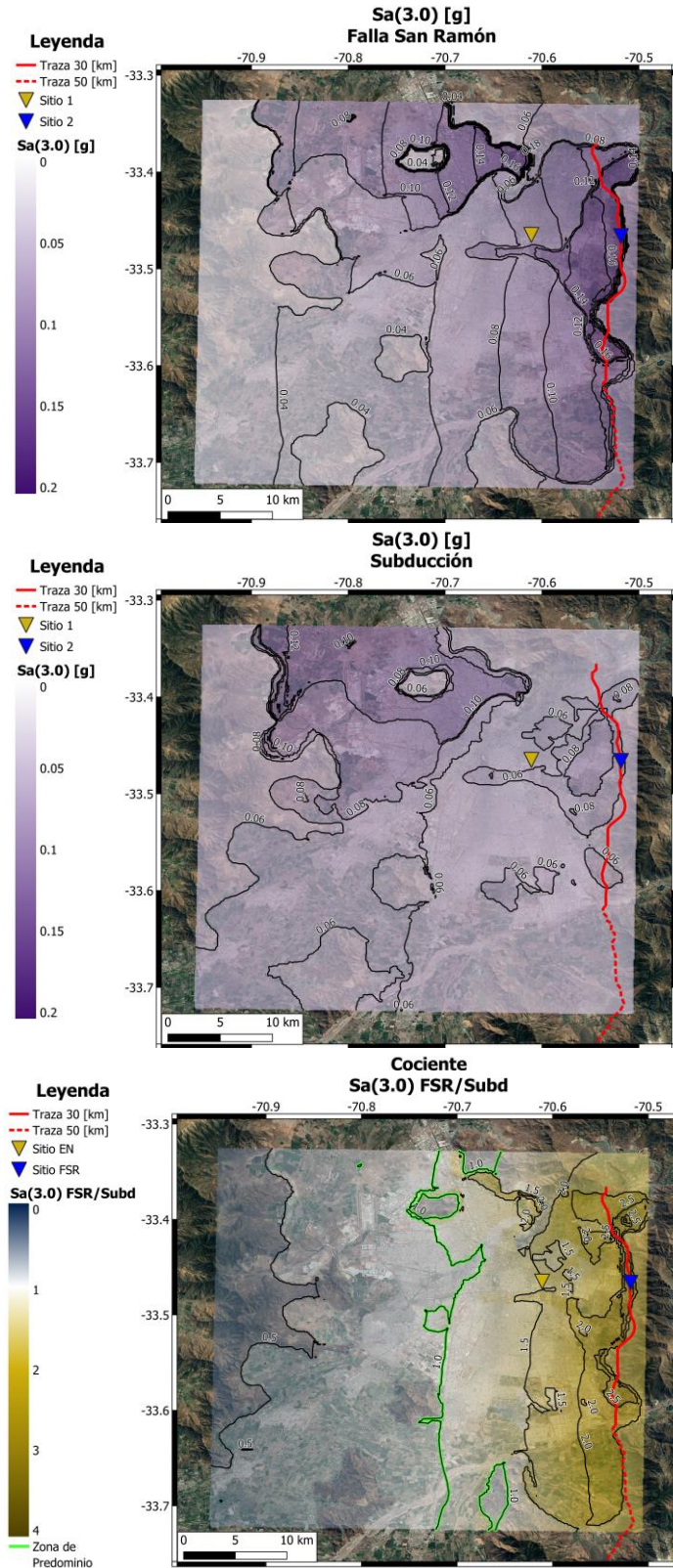


Figura 20. Mapas de amenaza de mediana de $Sa(3.0)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 9.3$, e intraplaca $M_w 8.5$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

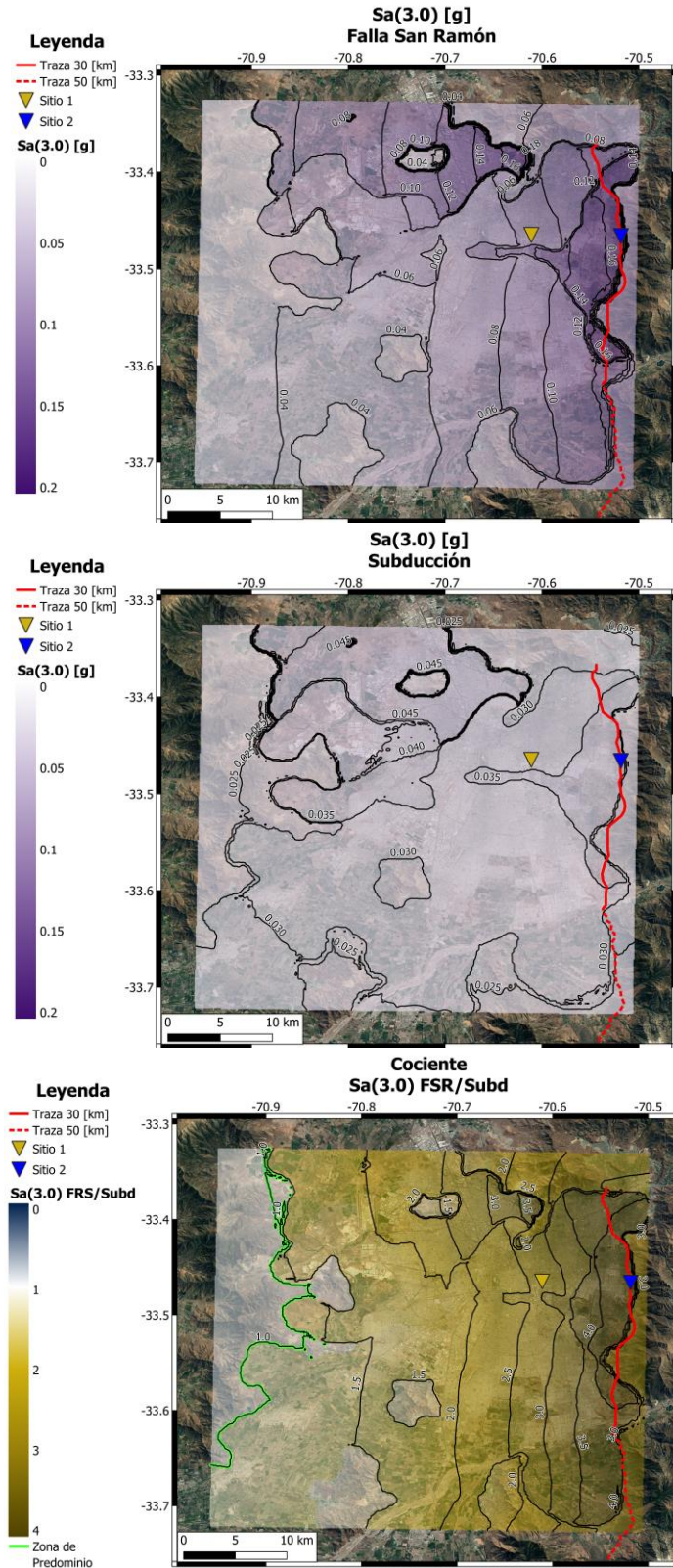


Figura 21. Mapas de amenaza de mediana de $Sa(3.0)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 8.0$, e intraplaca $M_w 7.8$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

4.2 Resultados Análisis Probabilístico de la Amenaza Sísmica (PSHA)

En el análisis probabilístico de la amenaza sísmica (PSHA), se consideran todos los escenarios posibles de las 3 fuentes; la Falla San Ramón, los eventos interplaca y los eventos intraplaca. Bajo este contexto, se utilizan los modelos descritos en las secciones 4.1 y 4.2 del presente documento.

4.2.1 Curvas de Amenaza Sísmica

Al igual que en los mapas de amenaza del enfoque determinístico, se escoge como intensidades de estudio el *PGA* y las ordenadas espectrales $S_a(0.3)$, $S_a(1.0)$ y $S_a(3.0)$ para determinar las curvas amenaza sísmica en los sitios 1 y 2. Las Figuras 22 y 23 presentan los resultados para *PGA* y $S_a(3.0)$ respectivamente. En estas se aprecia un bajo aporte a la amenaza por parte de la Falla San Ramón (rojo) en relación a la amenaza generada por los eventos de subducción (amarillo). En efecto, la curva de amenaza que contempla tanto eventos de subducción como la Falla San Ramón (negra discontinua), no presenta grandes diferencias con la que toma en cuenta únicamente la subducción. Además, se presentan las curvas de amenaza asociadas únicamente a eventos interplaca (azul) y a eventos intraplaca (verde). Se puede notar que para *PGA* (ver Figura 22) tanto los eventos interplaca como intraplaca generan similar amenaza para todos los niveles de intensidad, muy por sobre la generada por la Falla San Ramón. Sin embargo, para periodos de vibración más altos los eventos interplaca suponen una mayor amenaza sísmica que los eventos intraplaca y de la Falla San Ramón para ambos sitios de estudio (ver Figura 23 y Figuras A 16 y A 17 en anexos). En el caso de un periodo de vibración de 3.0 [s] (ver Figura 23), se aprecia que la Falla San Ramón genera mayor amenaza que los eventos intraplaca en el sitio de estudio 2 (sobre la traza de la falla) para aceleraciones espectrales mayores a 0.6 [g]. No obstante, la intersección ocurre para tasas de excedencia menores a 10^{-6} , lo que significa un periodo de retorno de más de un millón de años.

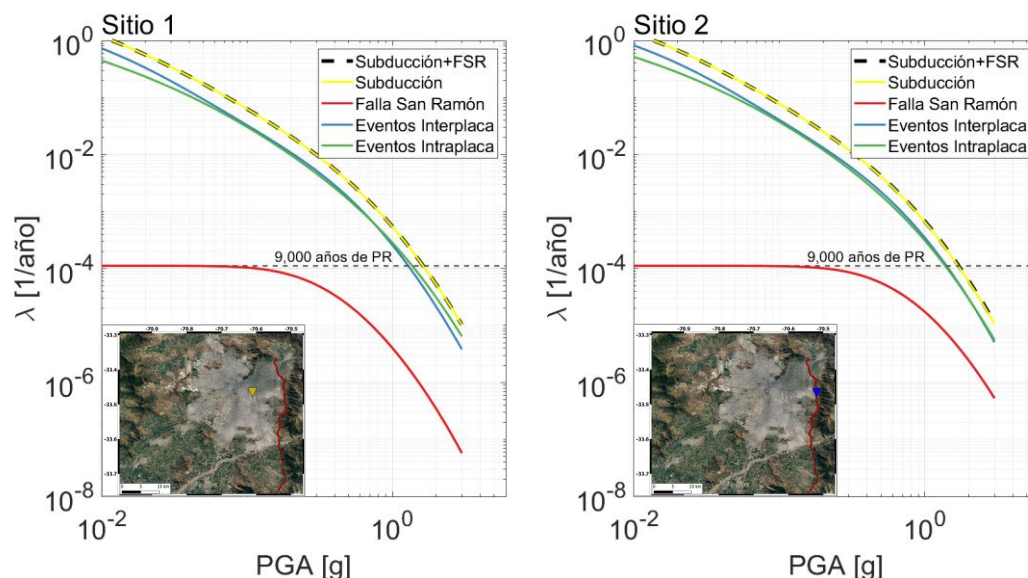


Figura 22. Curvas de amenaza sísmica de *PGA* de la Falla San Ramón (rojo), eventos interplaca (azul), eventos intraplaca (verde), envoltorio de la subducción (amarillo) y envoltorio de subducción y Falla San Ramón (negra discontinua), para ambos sitios de estudio.

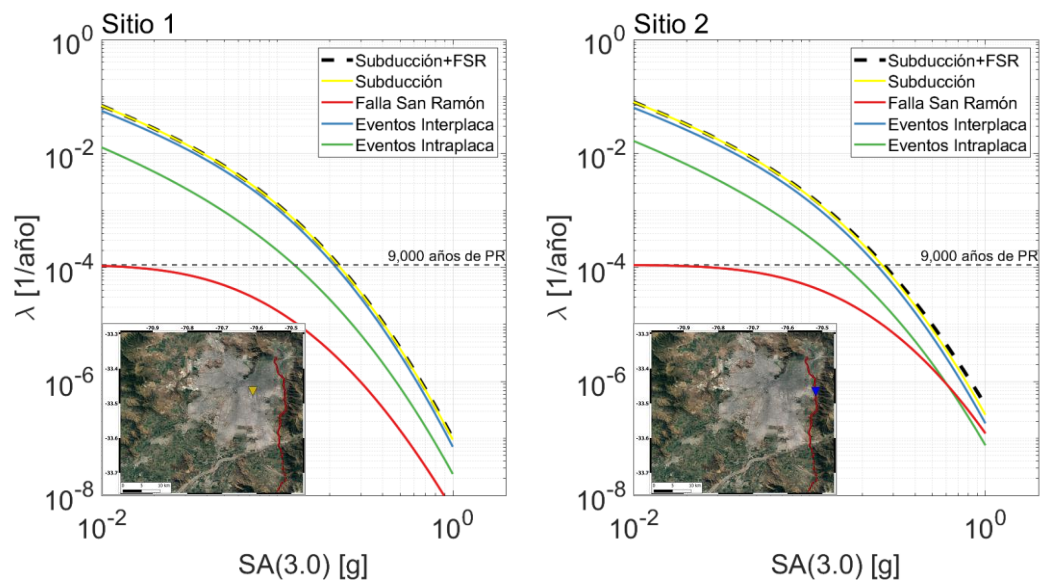


Figura 23. Curvas de amenaza sísmica de $Sa(3.0)$ de la Falla San Ramón (rojo), eventos interplaca (azul), eventos intraplaca (verde), envolvente de la subducción (amarillo) y envolvente de subducción y Falla San Ramón (negra discontinua), para ambos sitios de estudio.

Además, en las Figuras 22 y 23 se aprecia que, para valores de intensidad pequeños, la curva de amenaza de la Falla San Ramón presenta una tasa de excedencia constante ligeramente superior a $1.1 \times 10^{-4} \left[\frac{1}{\text{año}} \right]$, la cual corresponde a un periodo de retorno aproximado de 9,000 años. Visto que este valor se asemeja a la recurrencia media asignada a la falla en los modelos modelo presentado en la Figura 9, se puede decir que, ante cualquier activación de la Falla San Ramón, es esperable que se excedan estos niveles de intensidad en los sitios estudiados. Luego, en el caso del sitio 1 se espera que prácticamente toda activación de la Falla San Ramón genere PGA mayores a $0.1 [g]$ y $Sa(3.0)$ mayores a $0.01 [g]$, mientras que en el sitio 2 se esperan intensidades mayores a $0.2 [g]$ de PGA y $0.02 [g]$ de $Sa(3.0)$.

Las curvas de amenaza sísmica para las aceleraciones espectrales de $Sa(0.3)$ y $Sa(1.0)$ se presentan en los anexos.

4.2.2 Espectros de Amenaza Uniforme

Se calculan los espectros de amenaza uniforme para ambos sitios de estudio para periodos de retorno de 475, 2,475, 9,975 y 19,975 años, lo que corresponde a probabilidades de excedencia de 10%, 2%, 0.5% y 0.2% en 50 años, respectivamente, siguiendo la Ecuación 19.

La Figura 24 presenta los espectros de amenaza uniforme obtenidos para el sitio 1 (Ñuñoa), a la izquierda, y el sitio 2 (sobre la Falla San Ramón), la derecha. Para cada sitio, se presenta el espectro de amenaza uniforme considerando únicamente los eventos de procesos de subducción (azul) y considerando tanto eventos de subducción como de la Falla San Ramón (rojo).

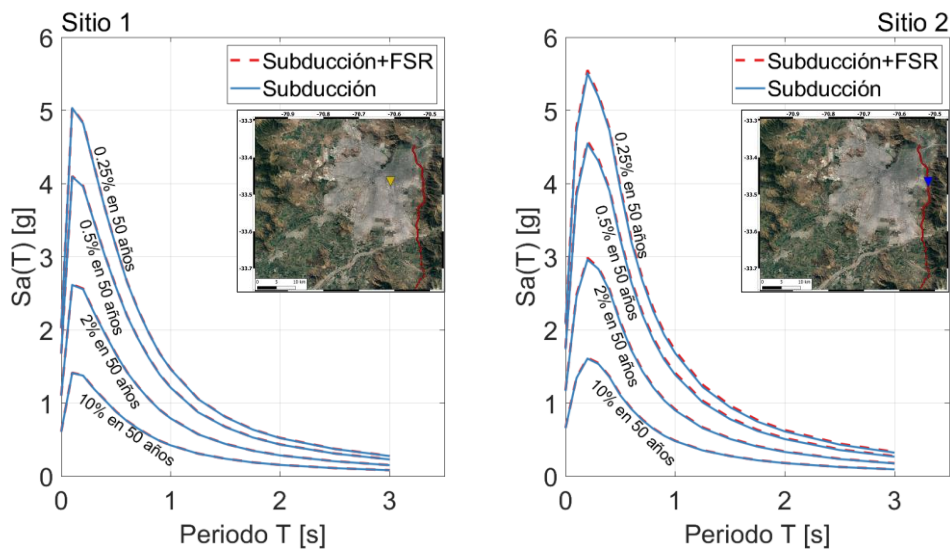


Figura 24. Espectros de amenaza uniforme para 0.25%, 0.5%, 2% y 10% de probabilidad de excedencia en 50 años para los eventos de subducción (azul) y eventos de subducción junto con los eventos de la Falla San Ramón (rojo).

Los espectros de amenaza uniforme del sitio 1 vuelven a demostrar que no existe una contribución considerable a la amenaza por parte de la Falla San Ramón, sin importar el periodo de retorno o el periodo espectral considerado. Por su parte, el sitio de estudio 2 presenta una pequeña influencia por parte de la Falla San Ramón, especialmente en periodos de retorno mayores. No obstante, sigue sin ser un aporte considerable con relación a la amenaza generada por los eventos de subducción.

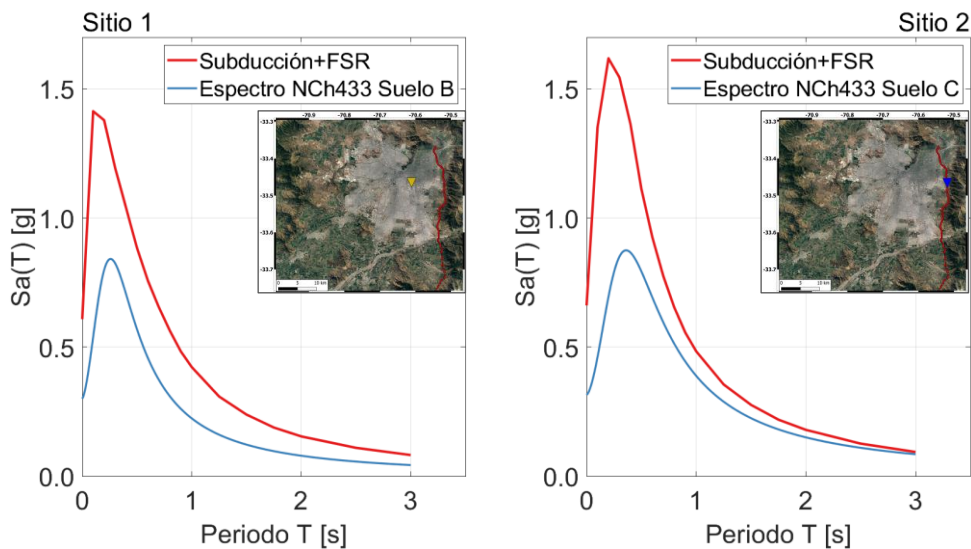


Figura 25. Espectro de amenaza uniforme para 10% de probabilidad de excedencia en 50 años (rojo) y espectro elástico de diseño la norma NCh433.Of1996 (azul) en ambos sitios de estudio.

En la Figura 25 se presenta el espectro elástico de diseño de la norma NCh433.Of1996 (azul) junto con el espectro de amenaza uniforme asociado a un periodo de retorno de 475 años (i.e. probabilidad de excedencia de 10% en 50 años) (rojo). Se puede apreciar una notoria diferencia en las aceleraciones

espectrales alcanzadas por cada curva, donde los valores correspondientes al espectro de amenaza uniforme duplican a los del espectro de diseño en el sitio 1. Si bien en el sitio 2 la diferencia es menor, aun se puede apreciar que la norma NCh433.Of1996 subestima considerablemente la amenaza en los sitios de estudio.

4.2.3 Mapas de Amenaza Sísmica PSHA

Se generan mapas de amenaza sísmica para niveles de intensidad fijos considerando las aceleraciones espectrales de estudio, PGA , $Sa(0.3)$, $Sa(1.0)$ y $Sa(3.0)$. Los valores de los niveles de intensidad considerados se presentan en la sección 4.4.4, Tabla 4. Las Figuras 26 y 27 presentan mapas de amenaza sísmica de PGA de la Falla San Ramón (arriba), los eventos de subducción (al centro) y el cociente de las probabilidades de excedencia de la Falla San Ramón y la subducción (abajo) para intensidades de 0.5 [g] y 1.0 [g] respectivamente.

Los mapas corroboran la información entregada por los espectros de amenaza uniforme y las curvas de amenaza sísmica en los sitios 1 y 2; La Falla San Ramón genera niveles de amenaza sísmica considerablemente menores que la subducción bajo un enfoque probabilístico. Lo anterior, considerando que las Figuras 26 y 27 presentan valores de cociente de probabilidades de no más de 0.005 y 0.035 para 0.5 [g] y 1.0 [g] respectivamente. En efecto, la falla tiene una probabilidad de 0.25% de generar valores de PGA superiores a 0.5 [g] en 50 años, y tan solo de 0.08% de superar 1.0 [g] en el mismo periodo de tiempo. Mientras que la subducción tiene probabilidades de 22% y 4% de superar los mismos niveles de intensidad.

Las Figura 28 y 29 presentan los mismos mapas que las Figura 26 y 27, con los mismos niveles de intensidad fija, pero tomando como intensidad de estudio $Sa(3.0)$. Nuevamente se observa que la amenaza generada por la Falla San Ramón es baja en comparación a la generada por la subducción. En este caso, la probabilidad de la falla de exceder 0.05 [g] y 0.5 [g] es de 0.4% y 0.003% respectivamente, mientras que la subducción alcanza probabilidades de excedencia de 50% y 0.03% para dichos niveles de intensidad. Así, el valor del cociente no supera 0.015 para 0.05 [g] y 0.20 para 0.5 [g].

Acerca de los eventos de subducción, al contrario de los mapas de amenaza obtenidos mediante el enfoque determinístico, se observan líneas de igual nivel de intensidad con dirección norte-sur. Estas sugieren que la zona interplaca es la que controla la amenaza.

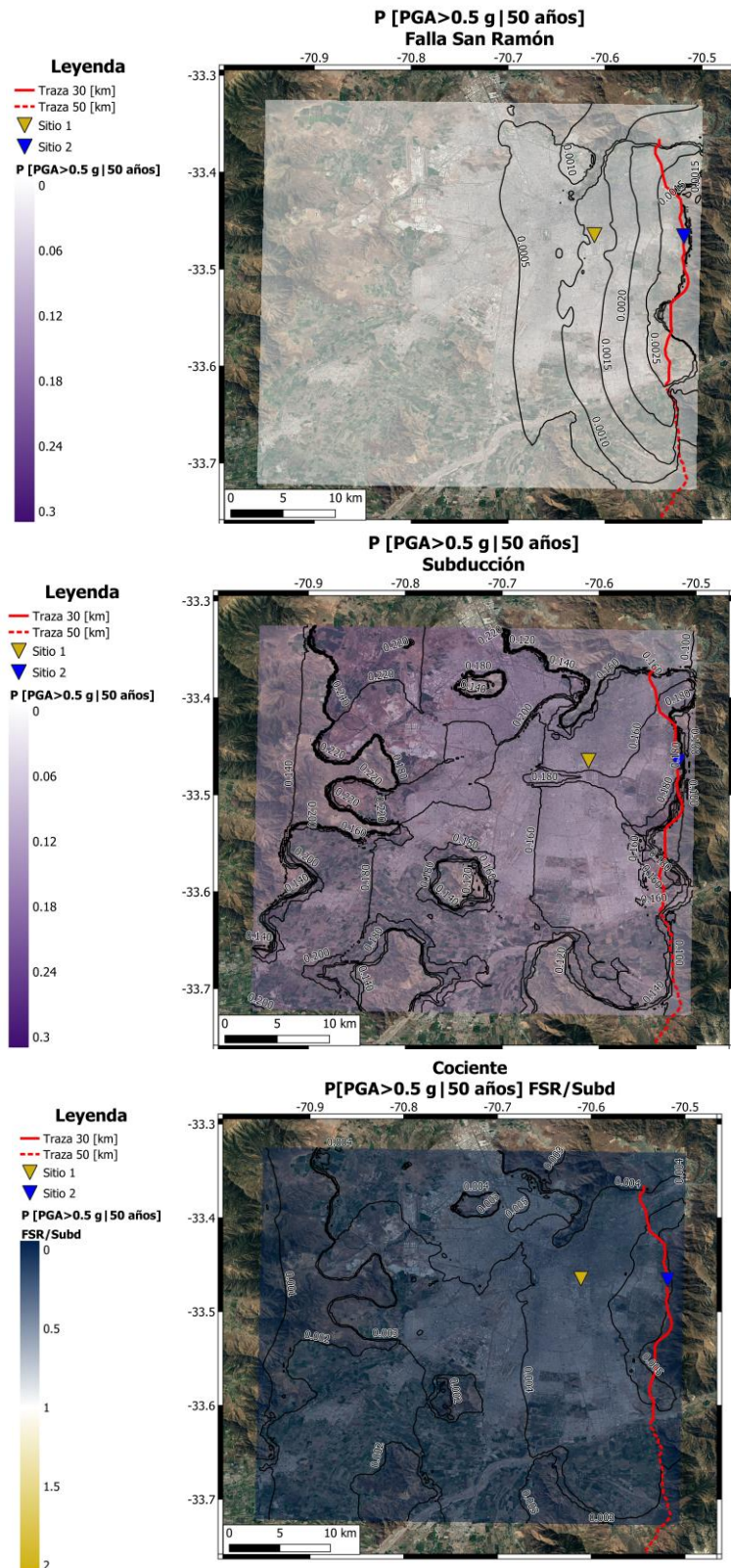


Figura 26. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de 0.5 [g] para PGA obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaca. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

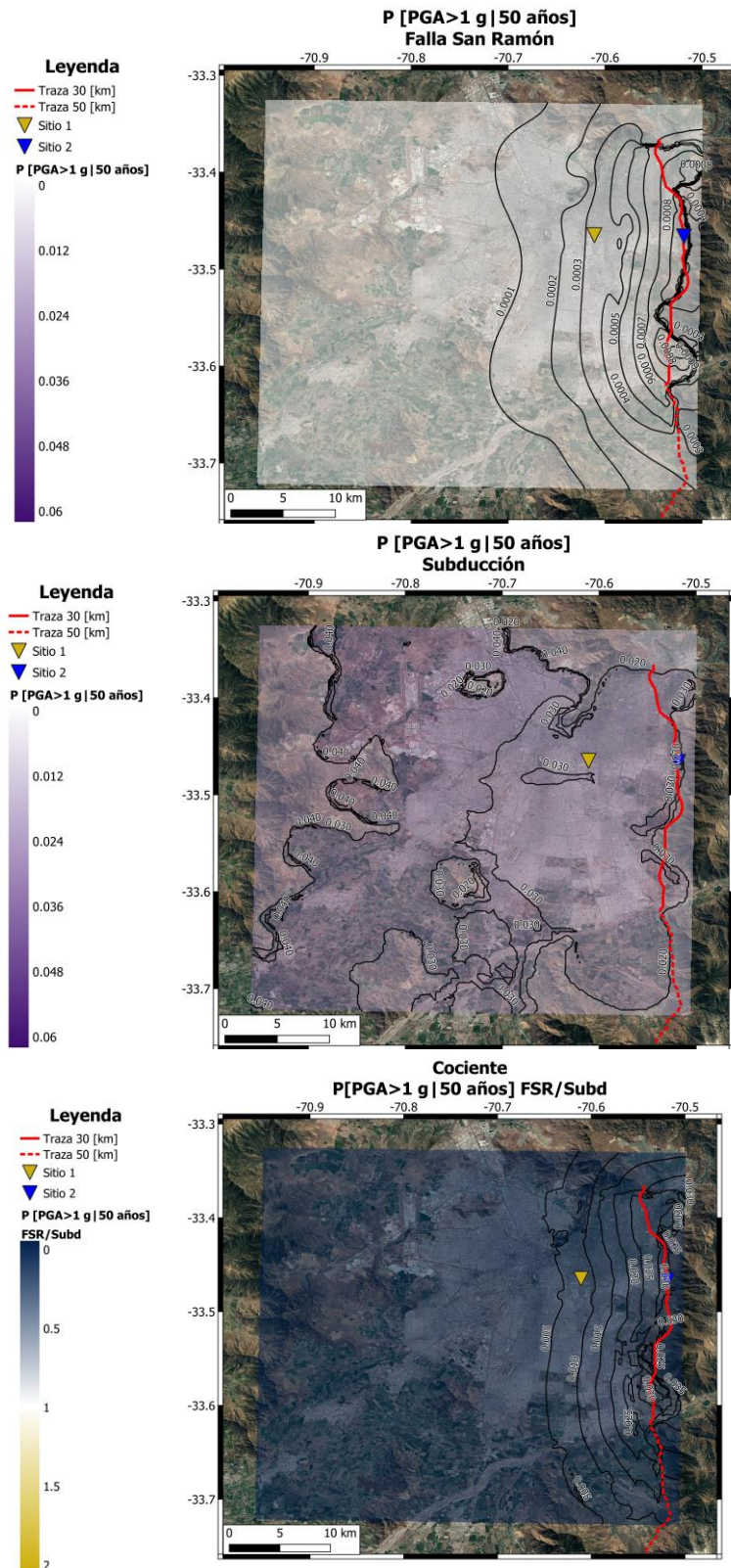


Figura 27. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de 1.0 [g] para PGA obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaca. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

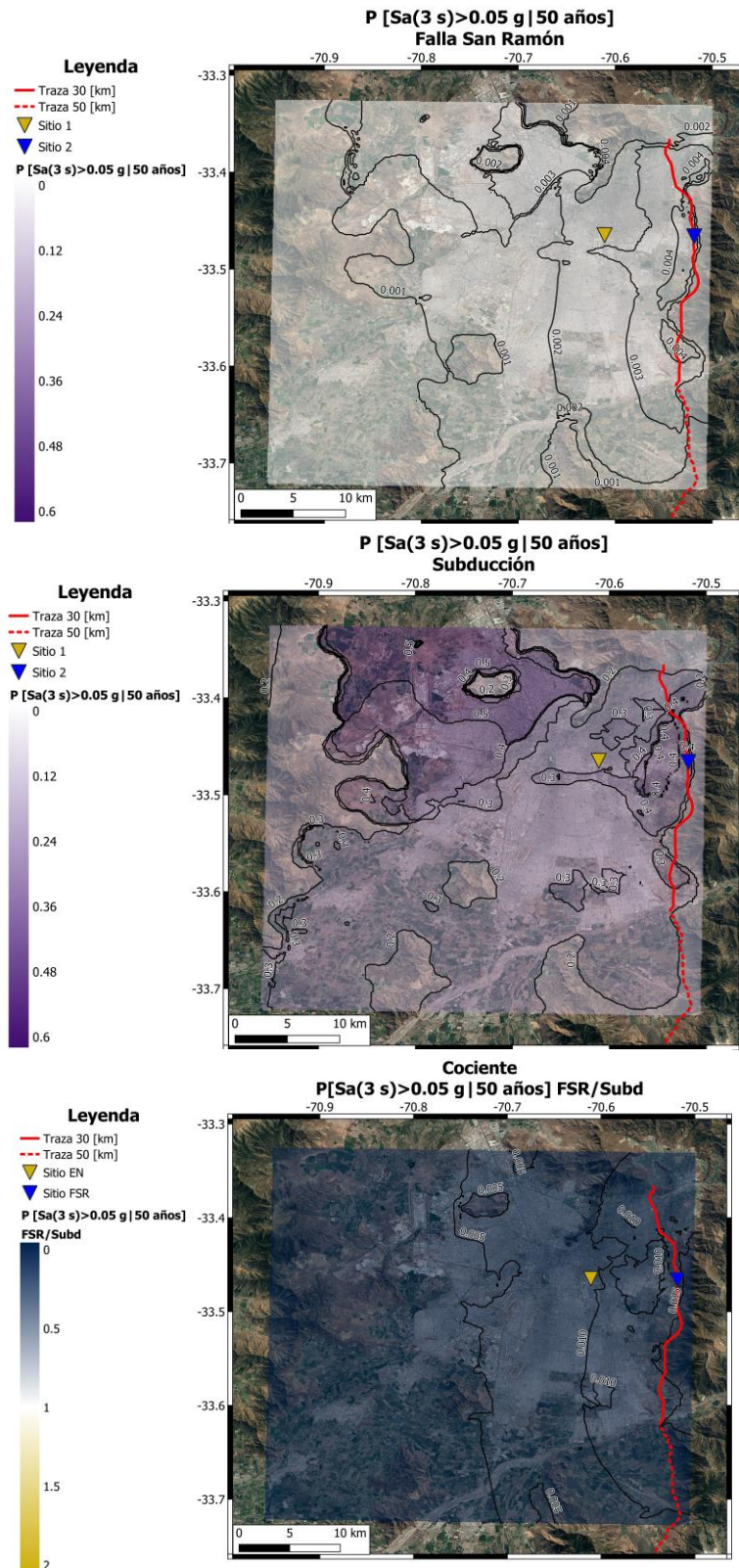


Figura 28. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de 0.05 [g] para $Sa(3.0)$ obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaca. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

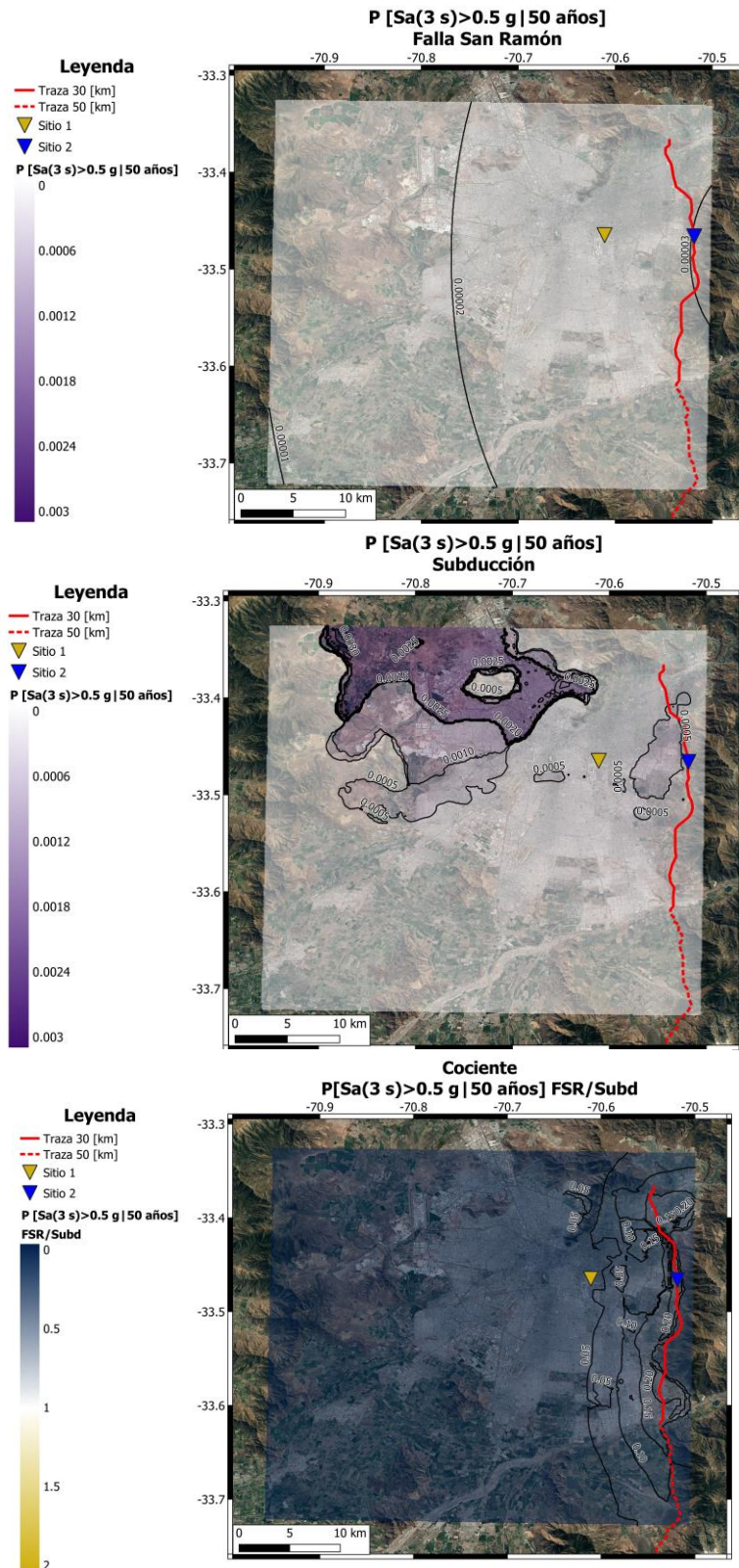


Figura 29. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de 0.5 [g] para $Sa(3.0)$ obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaca. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

5 Discusión

El estudio y la correcta caracterización de la amenaza sísmica generada por la Falla San Ramón es fundamental en el contexto sísmico de Chile. Esto no solo debido a su cercanía a la ciudad de mayor población e importancia económica del país (Banco Central, 2023), sino que por sus características sísmicas y su ubicación geológica. Considerando que la falla es capaz de alcanzar magnitudes de momento de hasta M_w 7.5, no existe otra falla cortical en Chile cuya actividad haya sido probada que tenga mayor magnitud, si se toma en cuenta la base de datos de fallas corticales de Maldonado et al. (2021). Además, la traza de la Falla San Ramón se ubica en el piedemonte de la Cordillera de los Andes, por lo que, representa la mayor distancia posible a la fosa de subducción de la placa de Nazca. Esto quiere decir que la amenaza generada por la subducción habrá experimentado más atenuación. En consecuencia, al comparar la amenaza generada por una falla cortical con la que genera la subducción, la Falla San Ramón constituye el escenario más favorable a tener grandes zonas de predominio dada su alta magnitud máxima y gran distancia a la fosa de subducción. Dicho esto, conocer las zonas de predominio que pueda generar la Falla San Ramón entrega un precedente para establecer hasta qué distancia se deben considerar las fallas corticales en los estudios de amenaza sísmica en Chile.

Las zonas de predominio determinadas en el presente estudio alcanzan distancias de hasta 40 [km] hacia el oeste para el caso de $Sa(3.0)$ (ver Figura 21), mientras que no más de 5 [km] al considerar PGA . Esto muestra la gran variabilidad de los resultados respecto al periodo de vibración considerado. En este sentido, resulta recomendable incorporar las fallas corticales, en los estudios de amenaza sísmica, cuando se encuentren a menos de 30 [km]. No obstante, la definición de la distancia a la cual considerar dichas fuentes puede hacerse de acuerdo con el periodo fundamental de la estructura. Esta opción resulta menos conservadora para periodos menores a 1 [s], pero más conservador para periodos mayores a aproximadamente 1.5 [s].

Resulta importante mencionar que las zonas de predominio de la Falla San Ramón, determinadas en la presente investigación, están sujetas al manto de la falla. Este parámetro tiene orientación hacia el este, lo que es fuera de la zona de estudio. En el caso de que la ciudad o la zona de estudio se hubiera ubicado en el bloque de techo de la falla, las zonas de predominio obtenidas habrían aumentado. Por lo que la distancia para saber si es necesario considerar fallas corticales debiese aumentarse si el sitio está en la misma dirección del manto.

En cuanto a la validez de los resultados, se debe tomar en cuenta el nivel de incertidumbre epistémica en torno a las fuentes sísmicas. En primer lugar, la longitud de la traza de la Falla San Ramón no se conoce con exactitud pudiendo ser de aproximadamente 30 [km] (Pérez et al., 2014) a 50 [km] (Ammirati et al., 2019) o incluso cuatro tramos independientes de 10 [km] (Estay et al., 2016), lo que influye directamente en la magnitud máxima capaz de generar la falla. Asimismo, el valor del manto presenta gran variabilidad entre los autores que han investigado la falla, tomando valores de entre 30° (Pérez et al., 2014) a 65° (Estay et al., 2016; Santibáñez et al., 2019).

Otra fuente de incertidumbre epistémica es el modelo de recurrencia utilizado para la Falla San Ramón. Debido a la falta de información de sismos de baja magnitud, no es posible ajustar un modelo de Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1944), por lo que se asignó un modelo de Evento Característico (Schwartz & Coppersmith, 1984). Las curvas de amenaza resultantes en los sitios de estudio 1 y 2 (ver Figura 22 y 23) presentan valores de tasa de excedencia constantes para intensidades bajas. Estos valores de tasa de excedencia corresponden a la tasa anual utilizada en el modelo de Evento Característico, lo que demuestra cuánto influye el parámetro de recurrencia de este modelo.

Los modelos de recurrencia utilizados para la subducción de la placa de Nazca corresponden a los propuestos por Poulos et al. (2019). Estos son los más actualizados a la fecha y consideran la mayor base de datos de sismos de la zona. No obstante, con el correr del tiempo ocurren nuevos sismos y se descubre evidencia de antiguos eventos de grandes magnitudes que dejan obsoletos a los modelos. Un ejemplo de ello es la investigación realizada por Salazar et al. (2022), quienes proponen la existencia de un sismo de M_w 9.5 interplaca en el Desierto de Atacama a partir de evidencias geoarqueológicas. La magnitud de este evento es mayor a la máxima propuesta por Poulos et al. (2019) en la zona sísmica 1, donde se ubica el Desierto de Atacama (ver Tabla 1). Así, nuevos modelos de recurrencia que incluyan este evento en caso de ser corroborado y futuros eventos podrán aportar a disminuir la incertidumbre epistémica de los resultados.

Asimismo, los modelos de movimiento fuerte seleccionados para los eventos interplaca e intraplaca no consideran eventos que alcancen las magnitudes máximas establecidas por Poulos et al. (2019). Esto implica que las estimaciones de aceleraciones para eventos de altas magnitudes pueden no ajustarse de buena manera y presentar altos grados de incertidumbre. Dado esto, en el caso del Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica, resultan más confiables las curvas y mapas considerando M_w 8.0 y M_w 7.8 para los eventos interplaca e intraplaca respectivamente. En consecuencia, los resultados del presente estudio se deben actualizar ante la publicación de nuevos modelos de recurrencia y nuevos modelos de movimiento fuerte.

Del mismo modo, los modelos de movimiento fuerte no cuentan con una gran base de datos de registros medidos a campo cercano (distancias sitio-fuente sísmica pequeñas). Esto quiere decir que la amenaza estimada en los sitios cercanos a las rupturas o hipocentros de los eventos simulados cuentan con un alto nivel de incertidumbre. De esta manera, la amenaza sísmica de los sitios ubicados en las proximidades de la traza de la Falla San Ramón podría estar subestimada. Pilz et al. (2011) señalan que eventos ocurridos en el campo cercano podrían producir aceleraciones espectrales altas en la cuenca de Santiago, mientras que Hussain et al. (2020) estimaron que los daños que podría producir un evento de estas características son mayores a los de un evento de magnitud de momento mayor a M_w 8.0 en la fosa de subducción.

Por lo que se refiere a los resultados de los mapas de amenaza, se aprecia una evidente diferencia en lo obtenido mediante el enfoque determinístico y el probabilístico. El Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica entrega mapas controlados por los eventos intraplaca o bien el de la Falla San Ramón, más no del

evento interplaca. Por otra parte, mediante este enfoque se determinan zonas de predominio de hasta 40 [km] (ver Figura 21) hacia el oeste de la traza de la Falla San Ramón. Al contrario, el Análisis Probabilístico de la Amenaza Sísmica presenta mayor amenaza de los eventos interplaca en todos los casos y para ninguna intensidad considerada se estiman zonas de predominio de la Falla San Ramón, la cual no alcanza a superar un 25% (ver Figura 29) de la amenaza generada por la subducción. Otra diferencia considerable en los mapas obtenidos por cada enfoque es el efecto que tienen las propiedades dinámicas del suelo en las intensidades estimadas, en el caso del Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica, se aprecia curvas de igual intensidad que siguen la forma del mapa de velocidad de onda corte promedio en los primeros 30[m] (ver Figura 11), mientras que en los mapas obtenidos por el Análisis Probabilístico de la Amenaza las curvas de igual intensidad parecen ser controladas por la distancia a la fuente sísmica.

A pesar de la diferencia de los resultados de las zonas de predominio de la Falla San Ramón en la zona de estudio según cada enfoque. Al comparar el espectro de amenaza obtenido por medio del enfoque determinístico y el espectro de amenaza uniforme obtenido según el enfoque probabilístico con el espectro de diseño elástico de la norma NCh433.Of1996, los resultados son similares; el espectro de diseño de la norma chilena subestima la amenaza en la zona de estudio. En el caso del enfoque determinístico, la Falla San Ramón supera al espectro de diseño para periodos de vibración altos (ver Figura 17). No obstante, en el caso del enfoque probabilístico, que el espectro de amenaza uniforme supere al de diseño no se produce por efecto del aporte de la Falla San Ramón (ver Figura 25). Esto que vuelve a resaltar la diferencia del aporte de la falla bajo los distintos enfoques.

Los resultados parecen indicar que es conveniente estudiar la amenaza sísmica generada por la Falla San Ramón bajo un enfoque determinístico o bien utilizar un modelo de recurrencia no Poissoniano, para evitar una dependencia tan grande de la tasa de activación de la falla. Ahora bien, al utilizar el método determinístico, a pesar de que en la sección 3.2 se menciona que se debe utilizar la máxima magnitud de la fuente sísmica para estudiar el “peor escenario posible”, estas no siempre son adecuadas para los modelos de movimiento fuerte disponibles, además de tener muy bajas probabilidades de ocurrencia. Así, queda a criterio del analista la magnitud a considerar y, por lo tanto, resulta ser un método subjetivo. En consecuencia, en caso de estudiar fallas corticales, sería prudente utilizar un enfoque determinístico si se contase con una metodología objetiva para la estimación de magnitudes de las distintas fuentes sísmicas, o bien, un enfoque probabilístico con modelos de recurrencia no Poissonianos.

6 Conclusiones

El estudio de la amenaza sísmica generada por la Falla San Ramón resulta vital para la ciudad de Santiago, considerando su nivel de urbanización y la importancia de las estructuras que se ubican cerca. A lo largo del mundo, eventos superficiales similares a los que puede generar la Falla San Ramón han tenido consecuencias catastróficas para zonas altamente pobladas como lo es Santiago.

En la presente investigación se observó que el espectro elástico de diseño de la norma NCh433.Of1996 subestima la amenaza tanto al considerar un enfoque determinístico como un enfoque probabilístico. Es por esto que se considera primordial actualizar las normas de diseño sísmico chilenas y, aclarar en qué circunstancias y cómo se debe estudiar la amenaza sísmica de las fallas corticales.

Dada la alta capacidad sismogénica de la Falla San Ramón, que podría alcanzar una magnitud de momento de M_w 7.5, y su lejanía a la fosa de subducción de la Placa de Nazca, se espera que las zonas de predominio que genere respecto a la amenaza de la subducción superen a la de la mayoría de las fallas corticales en Chile. Dado esto, su correcta caracterización de amenaza sísmica constituye una herramienta fundamental para la actualización de las normas de diseño sísmico.

Las zonas de predominio estimadas en el presente trabajo para la Falla San Ramón presentan grandes diferencias al cambiar el enfoque utilizado. Debido a su baja tasa de activación, la amenaza generada por la falla al utilizar un enfoque probabilístico alcanza niveles muy bajos en comparación a los eventos de subducción, siendo inferior a un valor de 25% de la generada por eventos interplaca e intraplaca. Ahora bien, al utilizar el enfoque determinístico, que no considera la tasa de activación, se observan zonas de predominio de 40 [km] para un periodo espectral de 3 [s], distancia medida en el bloque de muro. Dentro de estas zonas la amenaza generada por la Falla San Ramón puede ser hasta cuatro veces mayor a la que generan los eventos de subducción. Es por esto que se aconseja considerar fallas corticales en los estudios de amenaza sísmica cuando se ubiquen a menos de 20 [km], para periodos fundamentales menores o iguales a 1.5 [s] y a menos de 40 [km] para periodos mayores. Además, resulta prudente aumentar la distancia cuando el sitio se ubique en el bloque de techo. Debido a que estas distancias se obtuvieron a partir de un Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica, se aconseja utilizar este enfoque para estudiar la amenaza sísmica de fallas corticales a modo de ser conservadores. Sin embargo, es vital que las normas de diseño establezcan un procedimiento objetivo para la selección de magnitudes de momento. No resulta recomendable utilizar un enfoque probabilístico a menos de que se conozcan más datos sobre su sismicidad y su recurrencia mínima sea considerablemente menor a los ~9000 años de periodo de retorno de la Falla San Ramón.

Los parámetros sísmicos y geométricos de la Falla San Ramón aun no son conocidos con total certeza. En consecuencia, los resultados expuestos en el presente trabajo cuentan con alta incertidumbre epistémica. Dado esto, la falla debe continuar siendo estudiada, incorporando nuevas investigaciones que proporcionen más información para ajustar los resultados y obtener mayor confiabilidad. Junto con ello, la actualización de los modelos de recurrencia ante nuevos eventos o de los modelos de movimiento fuerte

ante la ocurrencia de eventos de alta magnitud, pueden aportar a una mejor estimación de las intensidades esperadas y de las zonas de predominio que genere la Falla San Ramón.

Los resultados parecen indicar que es fundamental modificar las regulaciones de urbanización para restringir la edificación sobre y próximo a su traza. Sin embargo, mayores estudios se deben hacer a los impactos que podría generar un evento en la Falla San Ramón sobre las estructuras cercanas a su traza.

7 Referencias

- Abrahamson, N. A., & Gulerce, Z. (2022). Summary of the Abrahamson and Gulerce NGA-SUB ground-motion model for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 38(4), 2638–2681. <https://doi.org/10.1177/87552930221114374>
- Acevedo, M. (2021). *Modelo de velocidades de la Cuenca de Santiago y estimación de su respuesta sísmica*. M.Sc. Thesis, Universidad de Chile.
- Akkar, S., Sandikkaya, M. A., & Bommer, J. 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(1), 359–387. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9461-4>
- Alvarado, P., Barrientos, S., Saez, M., Astroza, M., & Beck, S. (2009). Source study and tectonic implications of the historic 1958 Las Melosas crustal earthquake, Chile, compared to earthquake damage. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175(1–2), 26–36.
- Ammirati, J.-B., Vargas, G., Rebolledo, S., Abrahami, R., Potin, B., Leyton, F., & Ruiz, S. (2019). The crustal seismicity of the western Andean thrust (Central Chile, 33°–34° s): Implications for regional tectonics and seismic hazard in the Santiago area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(5), 1985–1999. <https://doi.org/10.1785/0120190082>
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., & Kausel, E. (2010). The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2). <https://doi.org/10.1029/2008tc002427>
- Astroza, M. (2007). Reinterpretación de las intensidades del terremoto de 1906. *VI Congreso Chileno de Geotecnia, Valparaíso, Chile, 28-29 November 2007*.
- Baker, J. W. (2013). *Introduction To Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. White Paper Version 2.0.1.
- Barrios, A. (2022). *Estimación del Período de Retorno de los Espectros de Diseño de la Norma NCH2745*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Bommer, J. J., Douglas, J., Scherbaum, F., Cotton, F., Bungum, H., & Fäh, D. (2010). On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis. *Seismological Research Letters*, 81(5), 783–793. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.5.783>
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & 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. <https://doi.org/10.1193/070113EQS184M>
- Brüggen, J. (1950). *Fundamentos de la Geología en Chile*. Instituto Geográfico Militar.
- Bustos, J., Pastén, C., Pavez, D., Acevedo, M., Ruiz, S., & Astroza, R. (2023). Two-dimensional simulation of the seismic response of the Santiago Basin, Chile. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, 107569. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107569>
- Campos, J., & Kausel, E. (1990). The large 1939 intraplate earthquake of southern Chile, *Seismological Research Letters*, 61(1), 43.
- Cifuentes, I. L., & Silver, P. G. (1989). Low-frequency source characteristics of the great 1960 Chilean earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 94(B1), 643–663. <https://doi.org/10.1029/JB094iB01p00643>
- Comte, D., Eisenberg, A., Lorca, E., Pardo, M., Ponce, L., Saragoni, R., Singh, S. K., & Suárez, G. (1986). The 1985 Central Chile earthquake: A repeat of previous great earthquakes in the region? *Science*, 233(4762), 449–453. <https://doi.org/10.1126/science.233.4762.449>
- Cornell, C. A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583–1606.
- Deierlein, G. G., Krawinkler, H., & Cornell, C. A. (2003). A framework for performance-based earthquake engineering. *Proceedings of the 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*, 273(140), 140–148.
- Dilsiz, A., Gunay, S., Mosalam, K., Miranda, E., Arteta, C., Sezen, H., Fischer, E., Hakhamaneshi, M., Hassan, W.,

- Alhawamdeh, B., Andrus, S., Archbold, J., Arslantürkoglu, S., Bektaş, N., Ceferino, L., Cohen, J., Duran, B., Erazo, K., Faraone, G., ... Safiey, A. (2023). StEER: 2023 Mw 7.8 Kahramanmaras, Türkiye Earthquake Sequence Preliminary Virtual Reconnaissance Report (PVRR). *StEER- February 6, 2023, Kahramanmaras, Türkiye, Mw 7.8 Earthquake*. <https://doi.org/https://doi.org/10.17603/ds2-7ry2-gv66>
- Easton, G., Inzulza, J., Pérez, S., Ejsmentewicz, D., & Jiménez, C. (2018). ¿Urbanización fallada? La Falla San Ramón como nuevo escenario de riesgo sísmico y la sostenibilidad de Santiago ,Chile. *Revista de Urbanismo*, *38*, 1–20.
- Estay, N. P., Yáñez, G., Carretier, S., Lira, E., & Maringue, J. (2016). Seismic hazard in low slip rate crustal faults, estimating the characteristic event and the most hazardous zone: Study case San Ramón Fault, in southern Andes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *16*, 2511–2528. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2511-2016>
- Esteva, L. (1967). Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico. *Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural y 3er Simposio Panamericano de Estructuras*, 3–8.
- Garcia, J., Weatherill, G., Pagani, M., Rodriguez, L., & Poggi, V. (2017). Building an open seismic hazard model for South America: The SARA-PSHA model. *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, *9*, 13.
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *34*(2), 185–188. <https://doi.org/10.1038/156371a0>
- Hagiwara, Y. (1974). Probability of earthquake occurrence as obtained from a Weibull distribution analysis of crustal strain. *Tectonophysics*, *23*(3), 313–318. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-1951\(74\)90030-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-1951(74)90030-4)
- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *84*(B5), 2348–2350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>
- Hayes, G. P., Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. M. (2018). Slab2 , a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, *362*(6410), 58–61.
- Hussain, E., Elliott, J. R., Silva, V., Vilar-Vega, M., & Kane, D. (2020). Contrasting seismic risk for Santiago, Chile, from near-field and distant earthquake sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *20*(5), 1533–1555. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1533-2020>
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., & Pastén, C. (2017). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *15*(5), 1853–1880. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0050-1>
- Kanaori, Y., & Kawakami, S. I. (1996). The 1995 7.2 magnitude Kobe earthquake and the Arima-Takatsuki tectonic line: implications of the seismic risk for central Japan. *Engineering Geology*, *43*, 135–150. [https://doi.org/10.1016/S0165-1250\(97\)80006-5](https://doi.org/10.1016/S0165-1250(97)80006-5)
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Krawinkler, H., & Miranda, E. (2004). Chapter 9: Performance-Based Earthquake Engineering. In *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. Bozorgnia Y., Bertero, V. V. Boca Raton.
- Krinitzsky, E. L. (2002). How to obtain earthquake ground motions for engineering design. *Engineering Geology*, *65*(1), 1–16. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00098-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00098-9)
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de La Tierra*, *10*(1), 221–258.
- Maldonado, V., Contreras, M., & Melnick, D. (2021). A comprehensive database of active and potentially-active continental faults in Chile at 1:25,000 scale. *Scientific Data*, *8*(1), 20. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00802-4>
- Miranda, E., Archbold, J., Berkeley, U. C., & Heresi, P. (2020). *Puerto Rico Earthquake Sequence Early Access Reconnaissance Report (EARR)* (Issue StEER).
- Moehle, J., & Deierlein, G. G. (2004). A framework methodology for performance-based earthquake engineering. *3th World Conf. on Earthquake Engineering*, 13.

- 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. <https://doi.org/10.1785/0120160221>
- Norambuena, A. (2006). *Estudio de los efectos del terremoto de La Ligua del 28 de marzo de 1965*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M., & Vigano, D. (2014). OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismological Research Letters*, 85(3), 692–702. <https://doi.org/10.1785/0220130087>
- Pérez, A., Ruiz, J. A., Vargas, G., Rauld, R., Rebolledo, S., & Campos, J. (2014). Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramón Fault at the eastern border of Santiago city, Chile. *Natural Hazards*, 71(1), 243–274. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0908-3>
- Pilz, M., Parolai, S., Stupazzini, M., Paolucci, R., & Zschau, J. (2011). Modelling basin effects on earthquake ground motion in the Santiago de Chile basin by a spectral element code. *Geophysical Journal International*, 187(2), 929–945. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05183.x>
- Rauld, R. (2002). *Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago Oriente, entre el río Mapocho y la quebrada de Macul*. Memoria para optar al título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Reiter, L. (1990). *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insight*. Columbia University Press.
- Rikitake, T. (1974). Probability of earthquake occurrence as estimated from crustal strain. *Tectonophysics*, 23(3), 299–312. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-1951\(74\)90029-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-1951(74)90029-8)
- Ruiz, S., & Madariaga, R. (2018). Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, 733, 37–56.
- Salazar, D., Easton, G., Goff, J., Guendon, J. L., González-Alfaro, J., Andrade, P., Villagrán, X., Fuentes, M., León, T., Abad, M., Izquierdo, T., Power, X., Sitzia, L., Álvarez, G., Villalobos, A., Olgún, L., Yrarrázaval, S., González, G., Flores, C., ... Campos, J. (2022). Did a 3800-year-old Mw ~9.5 earthquake trigger major social disruption in the Atacama Desert? *Science Advances*, 8(14). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm2996>
- Santibáñez, I., Cembrano, J., García-Pérez, T., Costa, C., Yáñez, G., Marquardt, C., Arancibia, G., & González, G. (2019). Crustal faults in the Chilean Andes: Geological constraints and seismic potential. *Andean Geology*, 46(1), 32–65. <https://doi.org/10.5027/andgeov46n1-3067>
- Saragoni, G. R., Lew, M., Naeim, F., Carpenter, L. D., Youssef, N. F., Rojas, F., & Adaros, M. S. (2010). Accelerographic measurements of the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 19(8), 866–875. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/tal.673>
- Schwartz, D. P., & Coppersmith, K. J. (1984). Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5681–5698. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05681>
- Scordilis, E. M. (2006). Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude. *Journal of Seismology*, 10(2), 225–236. <https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4>
- Shin, T. C., & Teng, T. L. (2001). An overview of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 895–913. <https://doi.org/10.1785/0120000738>
- Utsu, T. (1972). Aftershocks and earthquake statistics (3): Analyses of the distribution of earthquakes in magnitude, time and space with special consideration to clustering characteristics of earthquake occurrence (1). *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics*, 3(5), 379–441.
- Vargas, G., Klinger, Y., Rockwell, T. K., Forman, S. L., Rebolledo, S., Baize, S., Lacassin, R., & Armijo, R. (2014). Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. 42(12), 1083–1086. <https://doi.org/10.1130/G35741.1>

- Vigny, C., Socquet, A., Peyrat, S., Ruegg, J.-C., Métois, M., Madariaga, R., Morvan, S., Lancieri, M., Lacassin, R., Campos, J., Carrizo, D., Bejar-Pizarro, M., Barrientos, S., Armijo, R., Aranda, C., Valderas-Bermejo, M.-C., Ortega, I., Bondoux, F., Baize, S., ... Kendrick, E. (2011). The 2010 Mw 8.8 Maule Megathrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS. *Science*, 332(6036), 1417–1421. <https://doi.org/10.1126/science.1204132>
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
- Yáñez, G., Perez-Estay, N., Araya-Vargas, J., Sanhueza, J., Figueroa, R., Maringue, J., & Rojas, T. (2020). Shallow Anatomy of the San Ramón Fault (Chile) Constrained by Geophysical Methods: Implications for its Role in the Andean Deformation. *Tectonics*, 39(8), e2020TC006294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020TC006294>

8 Anexos

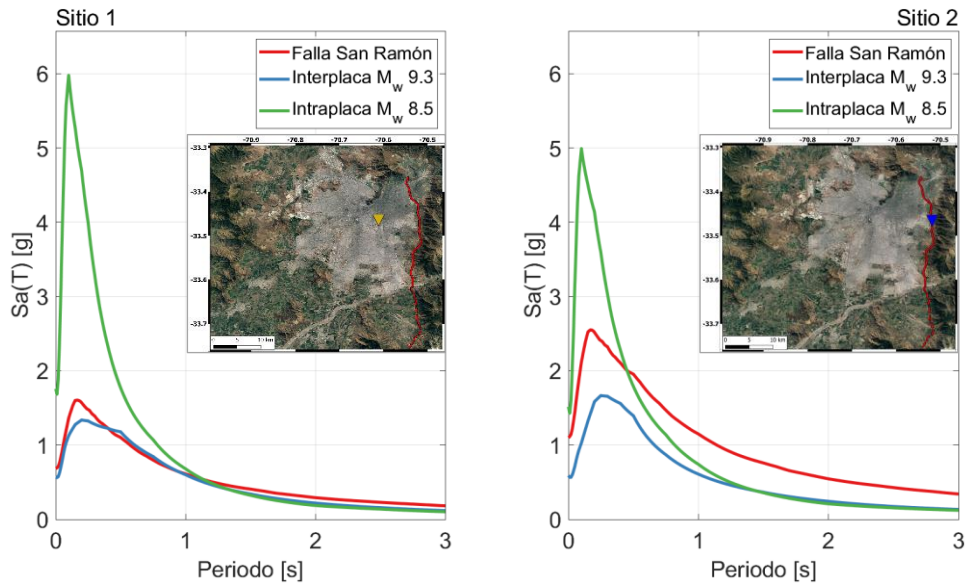


Figura A 1. Espectros de amenaza obtenidos mediante un enfoque determinístico, para el percentil 84 de la distribución de intensidades, considerando eventos de M_w 9.3 interplaca (azul), M_w 8.5 intraplaca (verde) y M_w 7.5 en la Falla San Ramón (rojo).

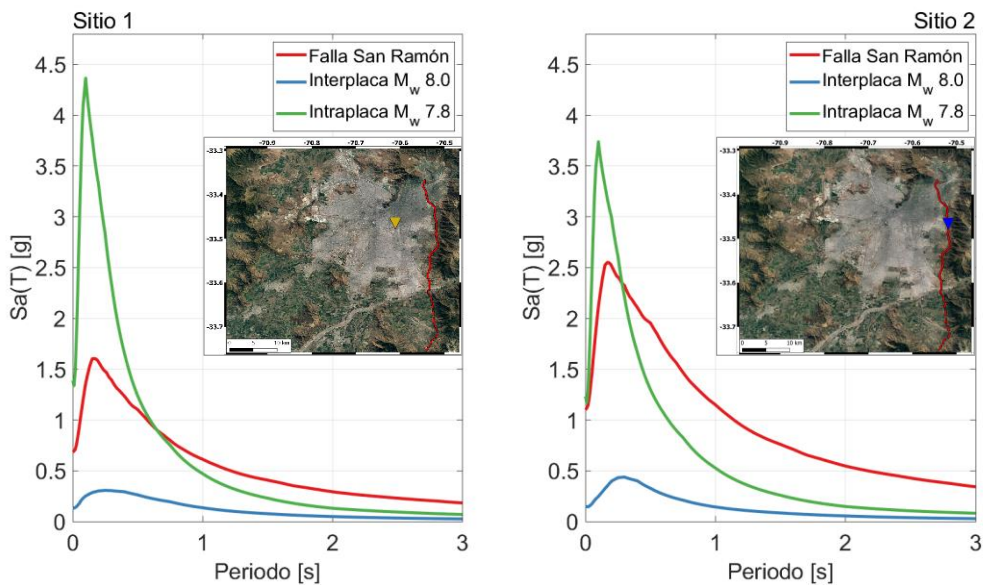


Figura A 2. Espectros de amenaza obtenidos mediante un enfoque determinístico, para el percentil 84 de la distribución de intensidades, considerando eventos de M_w 8.0 interplaca (azul), M_w 7.8 intraplaca (verde) y M_w 7.5 en la Falla San Ramón (rojo).

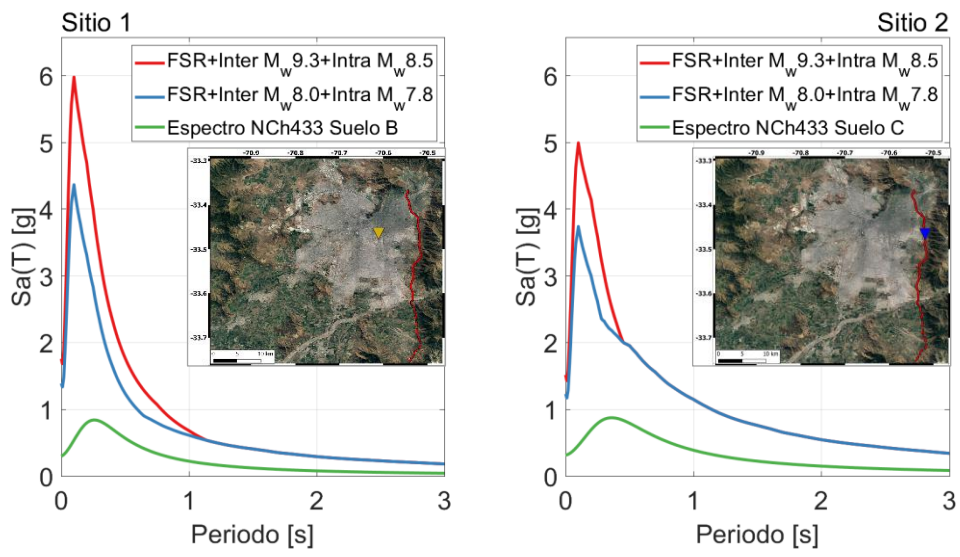


Figura A 3. Envolturas de los espectros presentados en las Figuras 30 (rojo) y 31 (azul), junto con el espectro elástico de diseño según la norma NCh433.Of1996 y el Decreto Supremo 61 (verde).

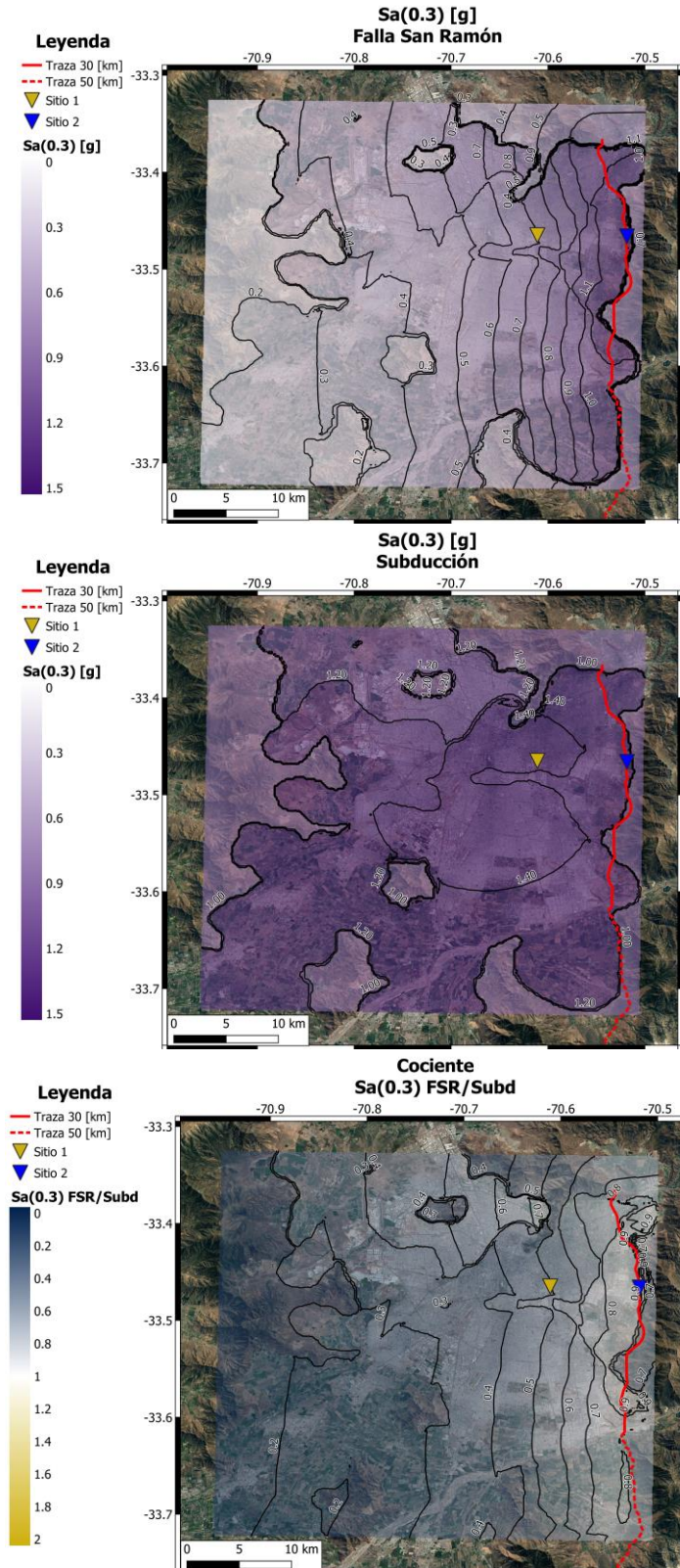


Figura A 4. Mapas de amenaza de mediana de $Sa(0.3)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 9.3$, e intraplaca $M_w 8.5$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

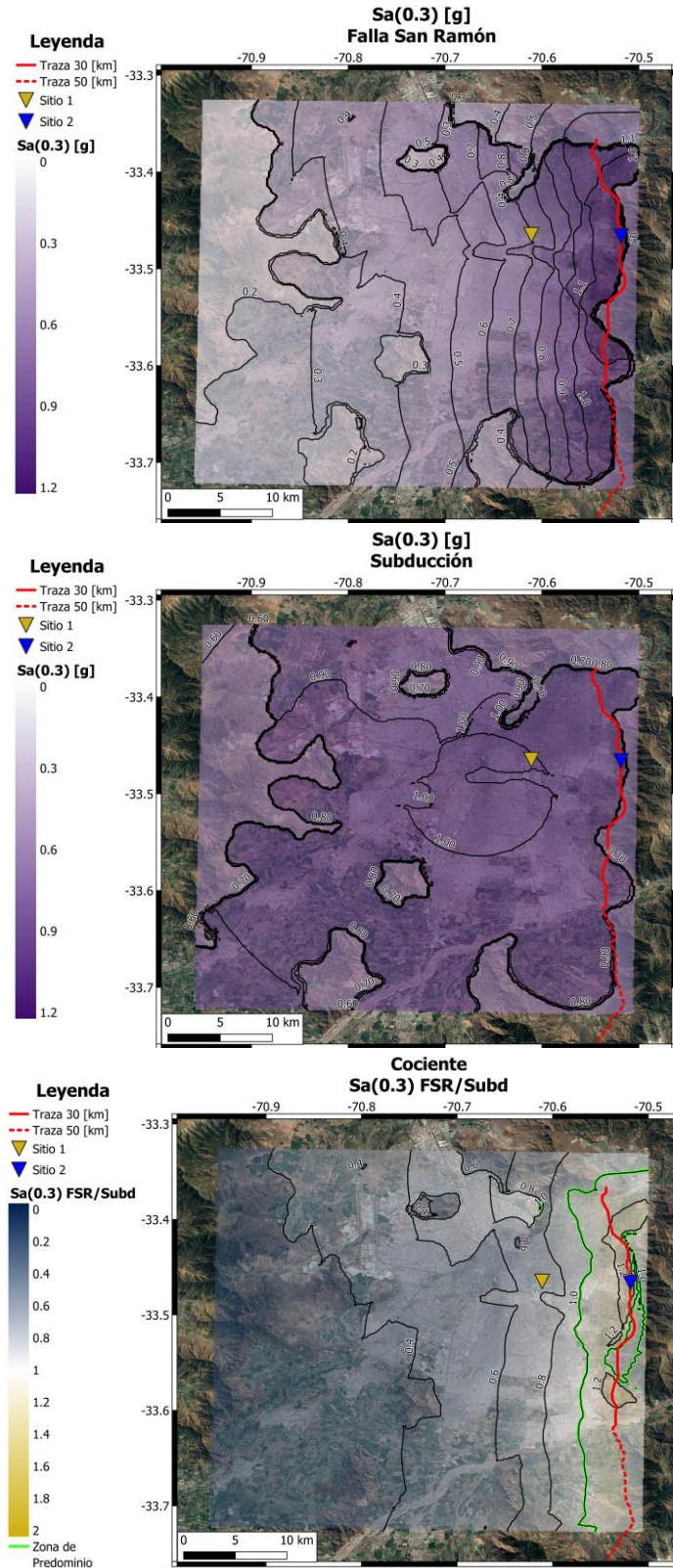


Figura A 5. Mapas de amenaza de mediana de $Sa(0.3)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 8.0$, e intraplaca $M_w 7.8$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

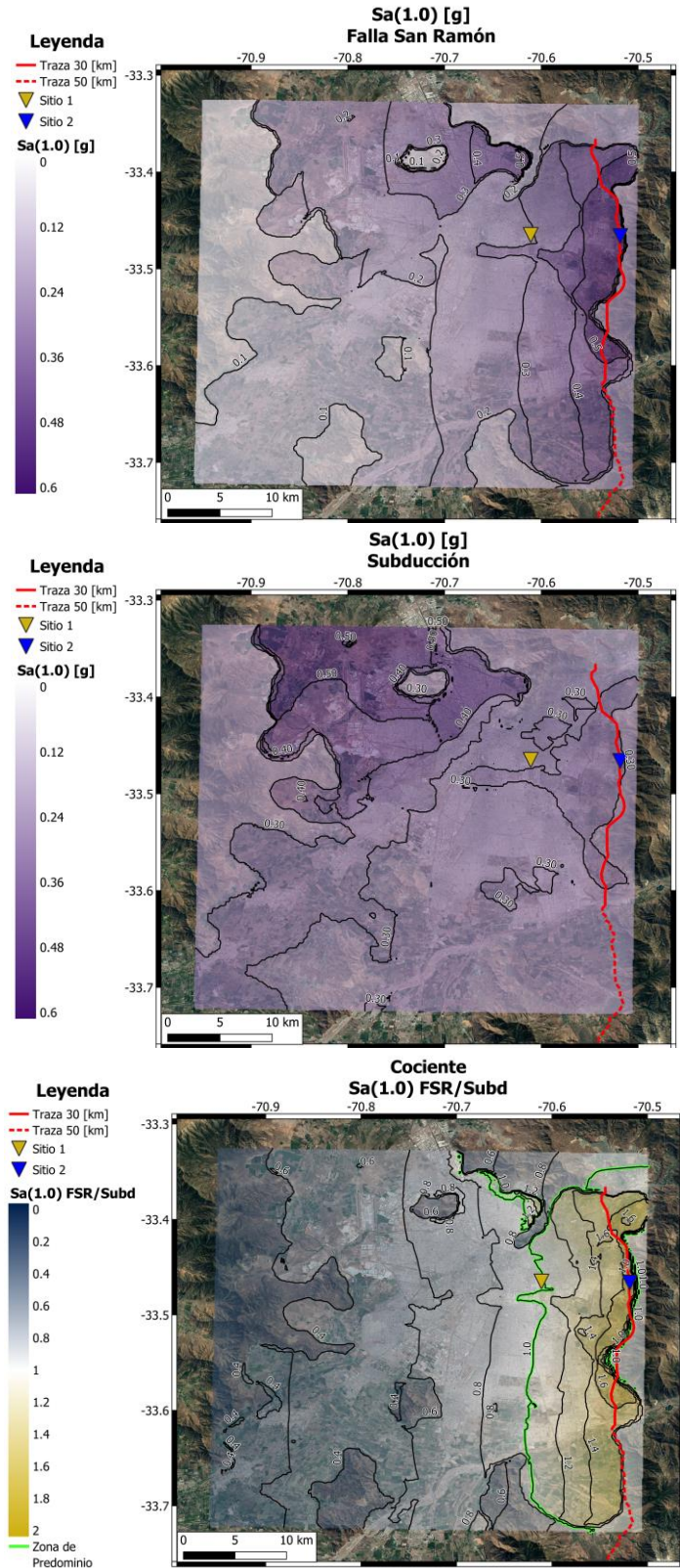


Figura A 6. Mapas de amenaza de mediana de $Sa(1.0)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, M_w 7.5. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca M_w 9.3, e intraplaca M_w 8.5. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

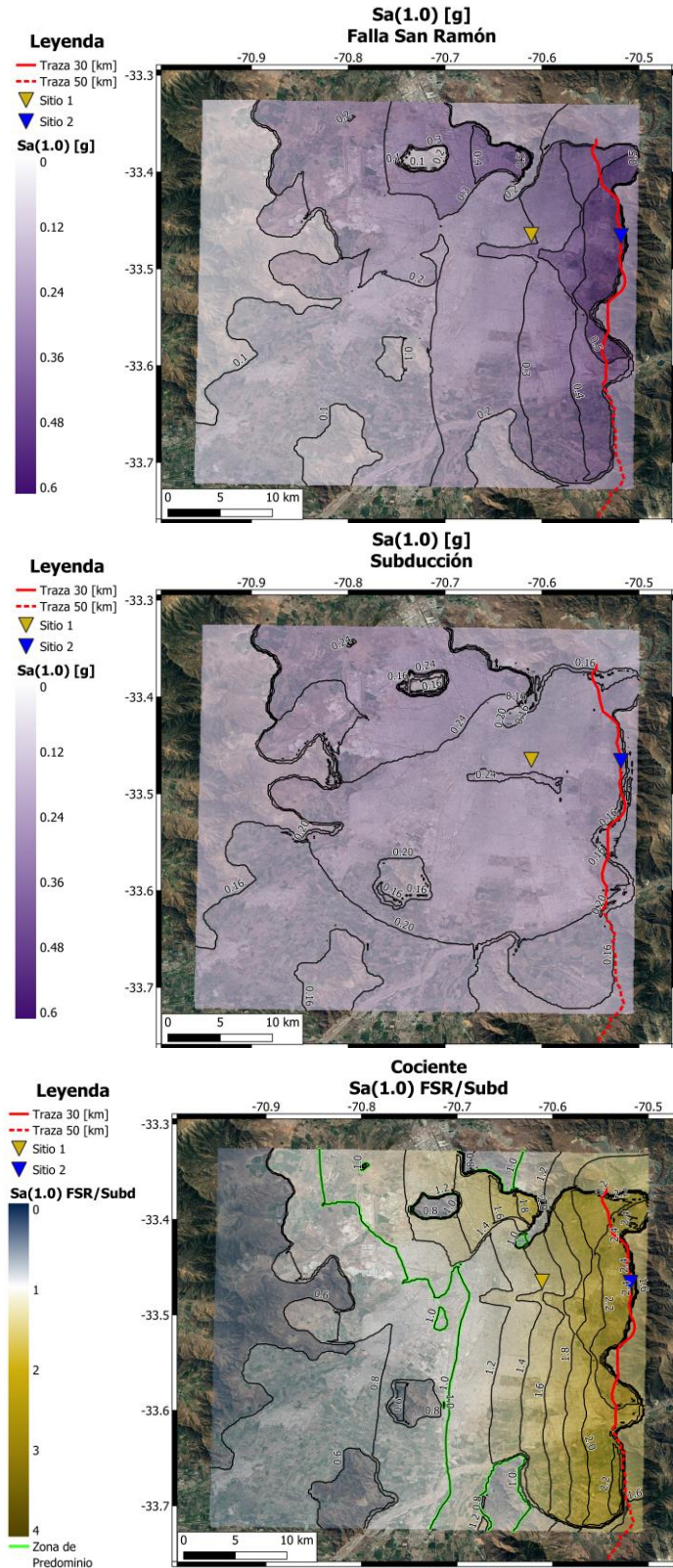


Figura A 7. Mapas de amenaza de mediana de $Sa(1.0)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 8.0$, e intraplaca $M_w 7.8$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

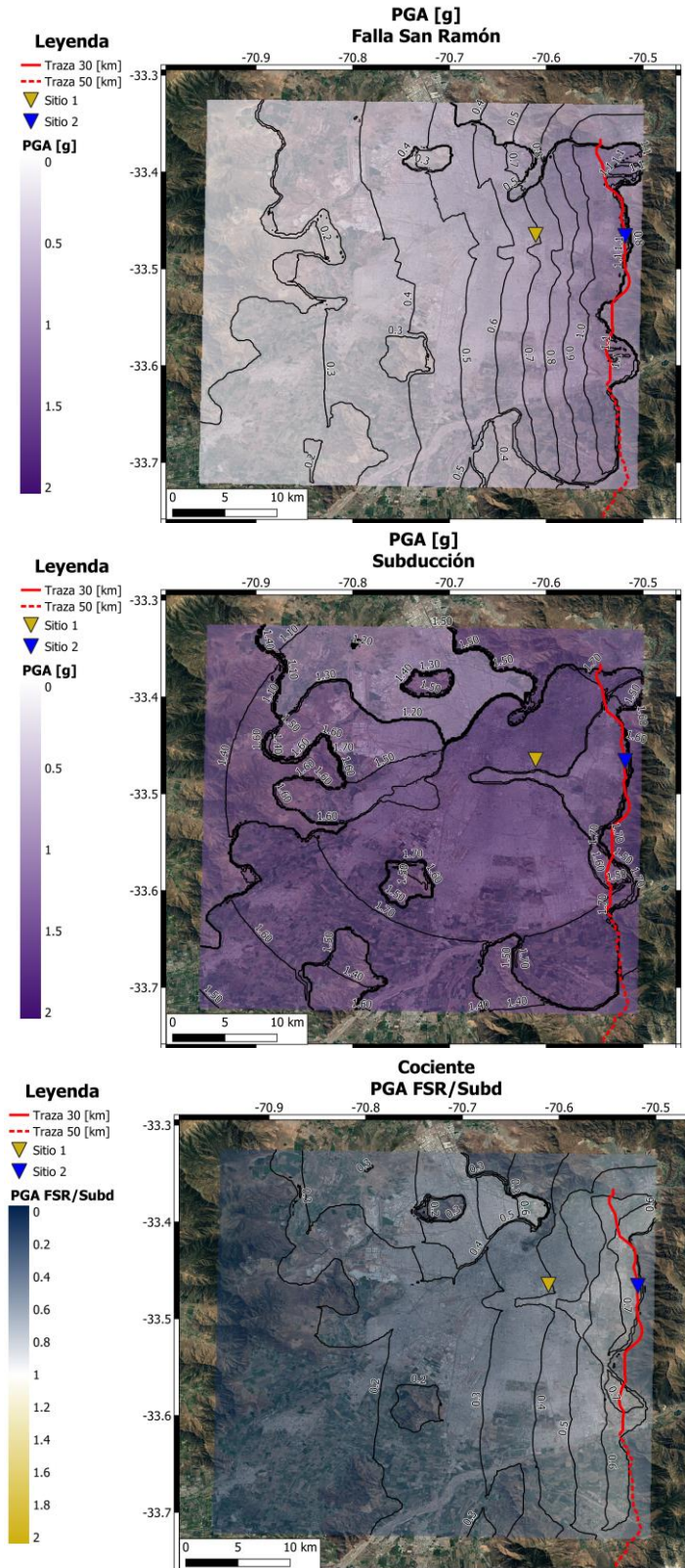
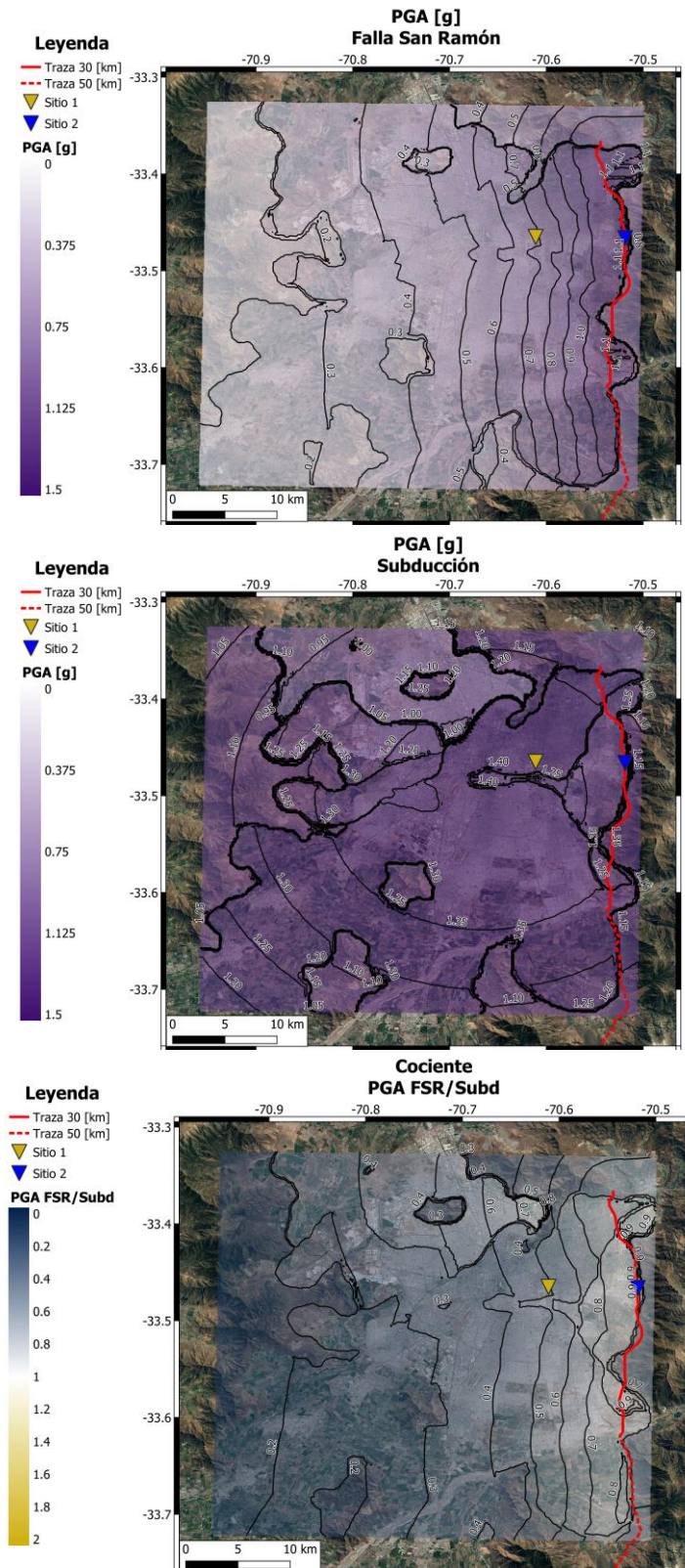


Figura A 8. Mapas de amenaza de percentil 84 de PGA obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, M_w 7.5. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca M_w 9.3, e intraplaca M_w 8.5. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.



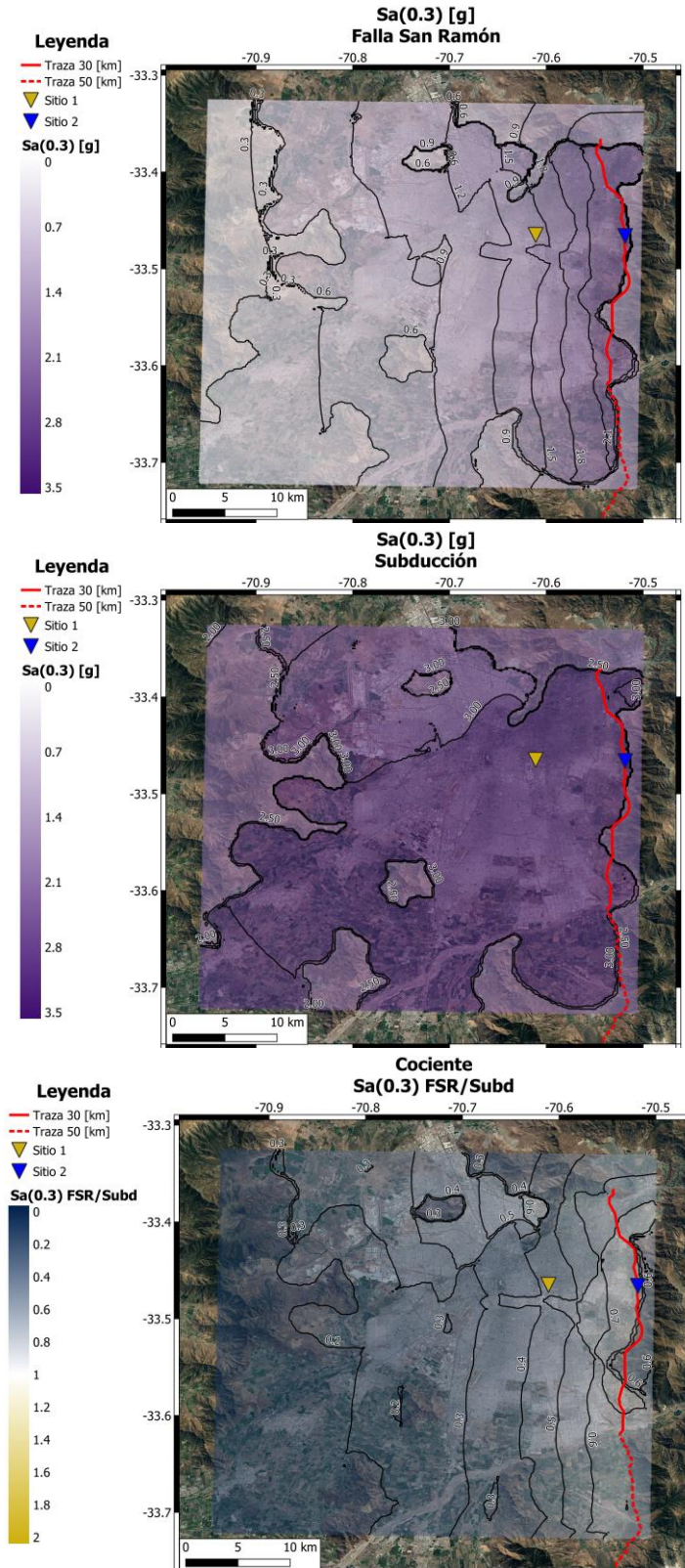


Figura A 10. Mapas de amenaza de percentil 84 de $Sa(0.3)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 9.3$, e intraplaca $M_w 8.5$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

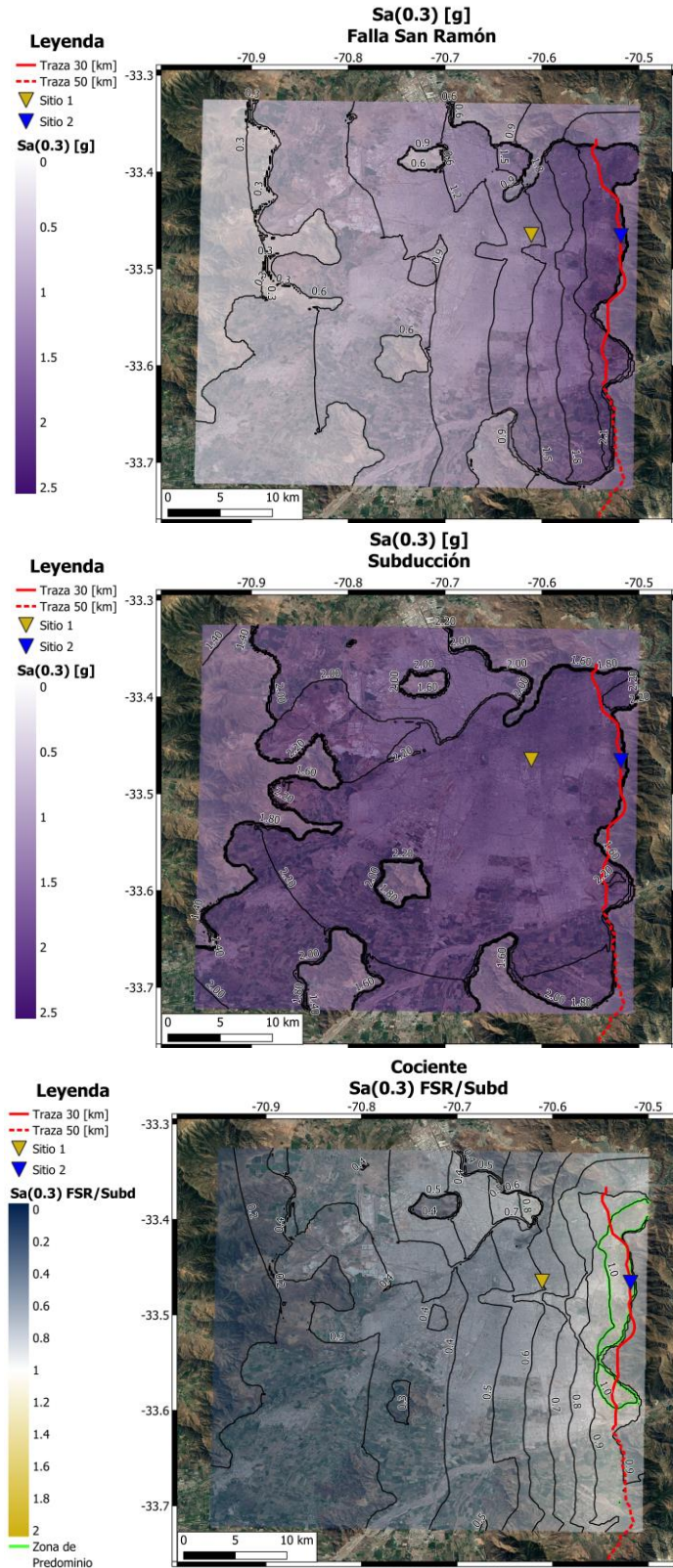


Figura A 11. Mapas de amenaza de percentil 84 de $Sa(0.3)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 8.0$, e intraplaca $M_w 7.8$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

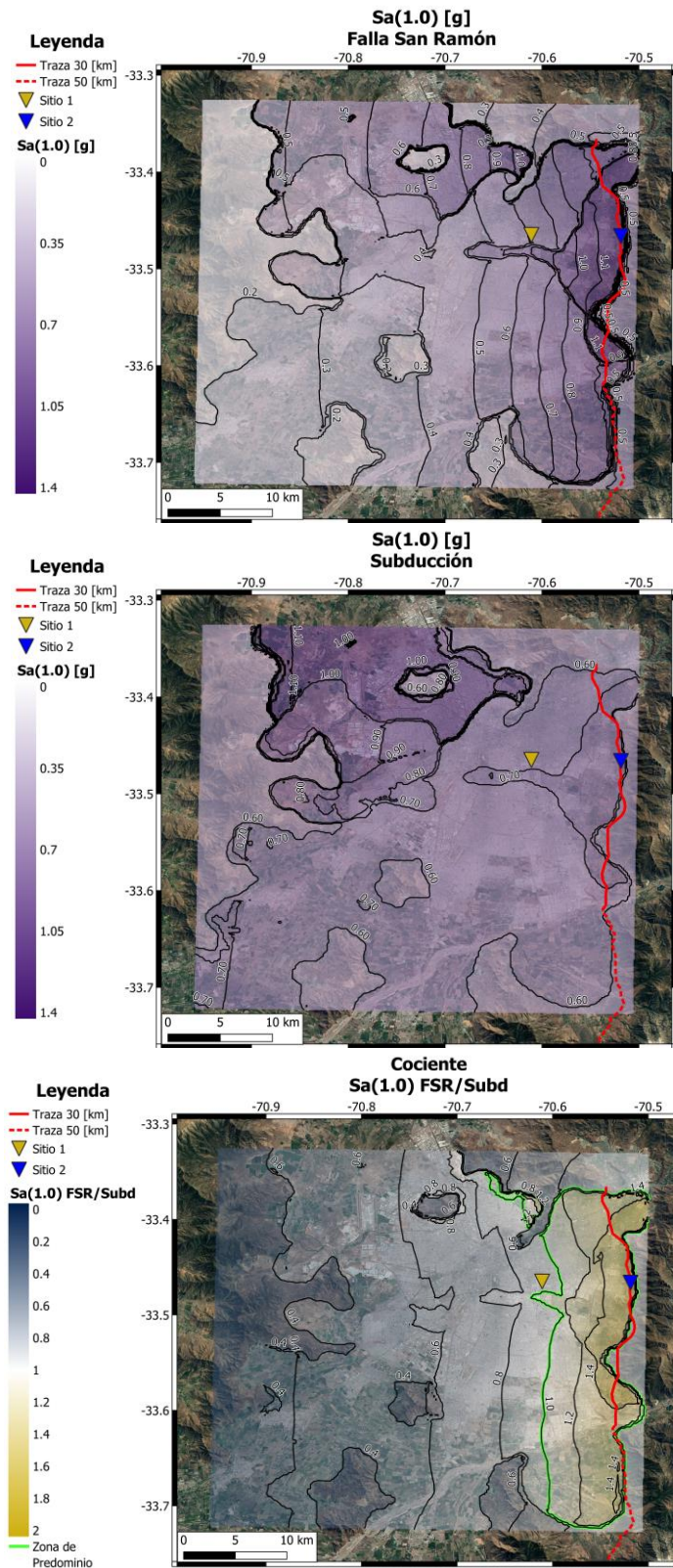


Figura A 12. Mapas de amenaza de percentil 84 de $Sa(1.0)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, M_w 7.5. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca M_w 9.3, e intraplaca M_w 8.5. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

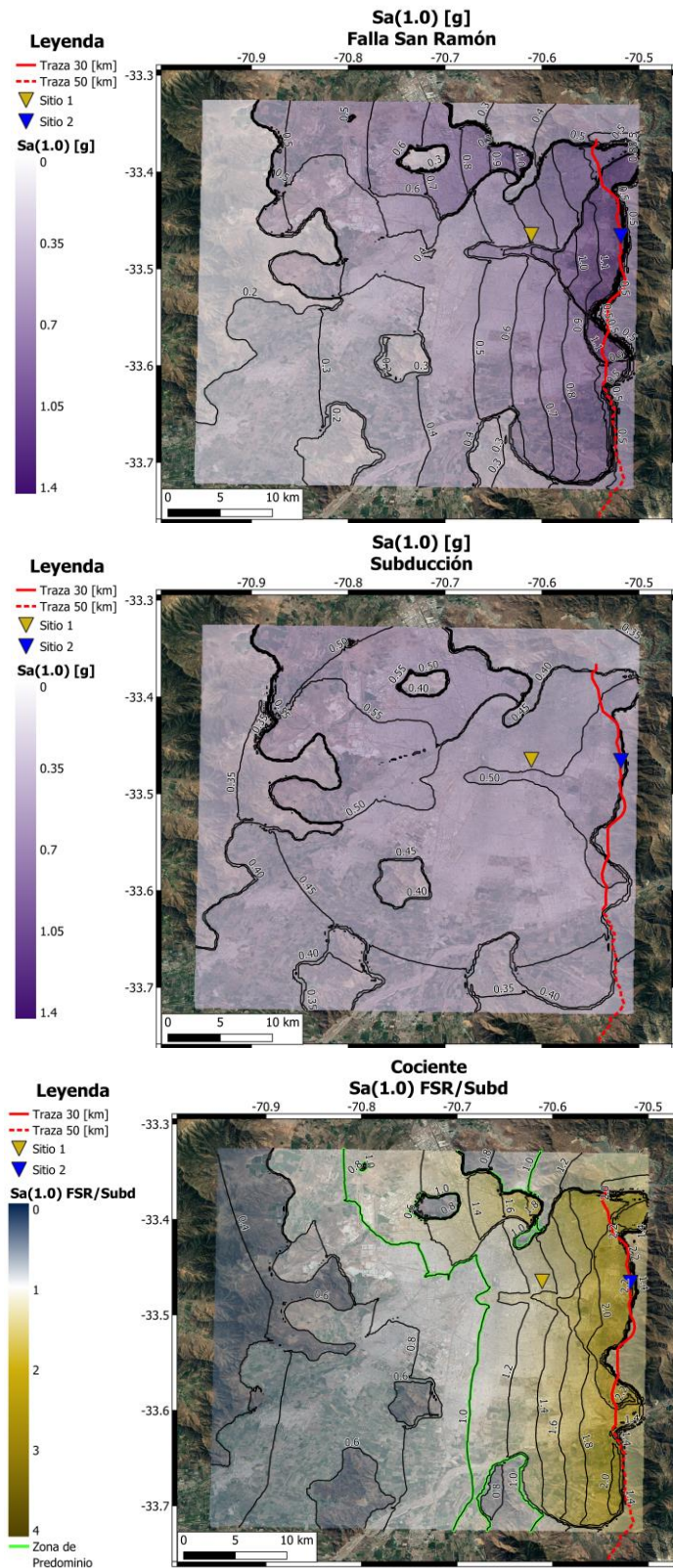


Figura A 13. Mapas de amenaza de percentil 84 de $Sa(1.0)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 8.0$, e intraplaca $M_w 7.8$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

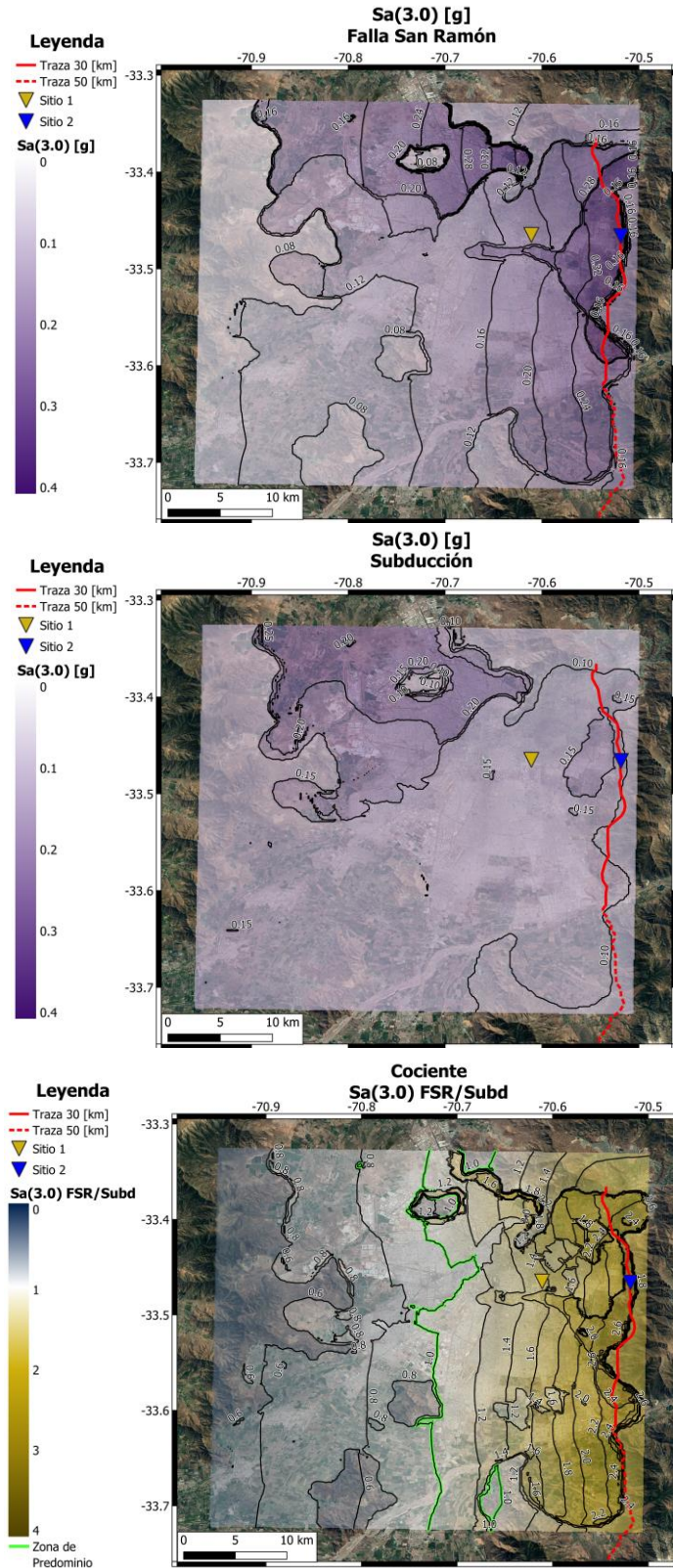


Figura A 14. Mapas de amenaza de percentil 84 de $Sa(3.0)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 9.3$, e intraplaca $M_w 8.5$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

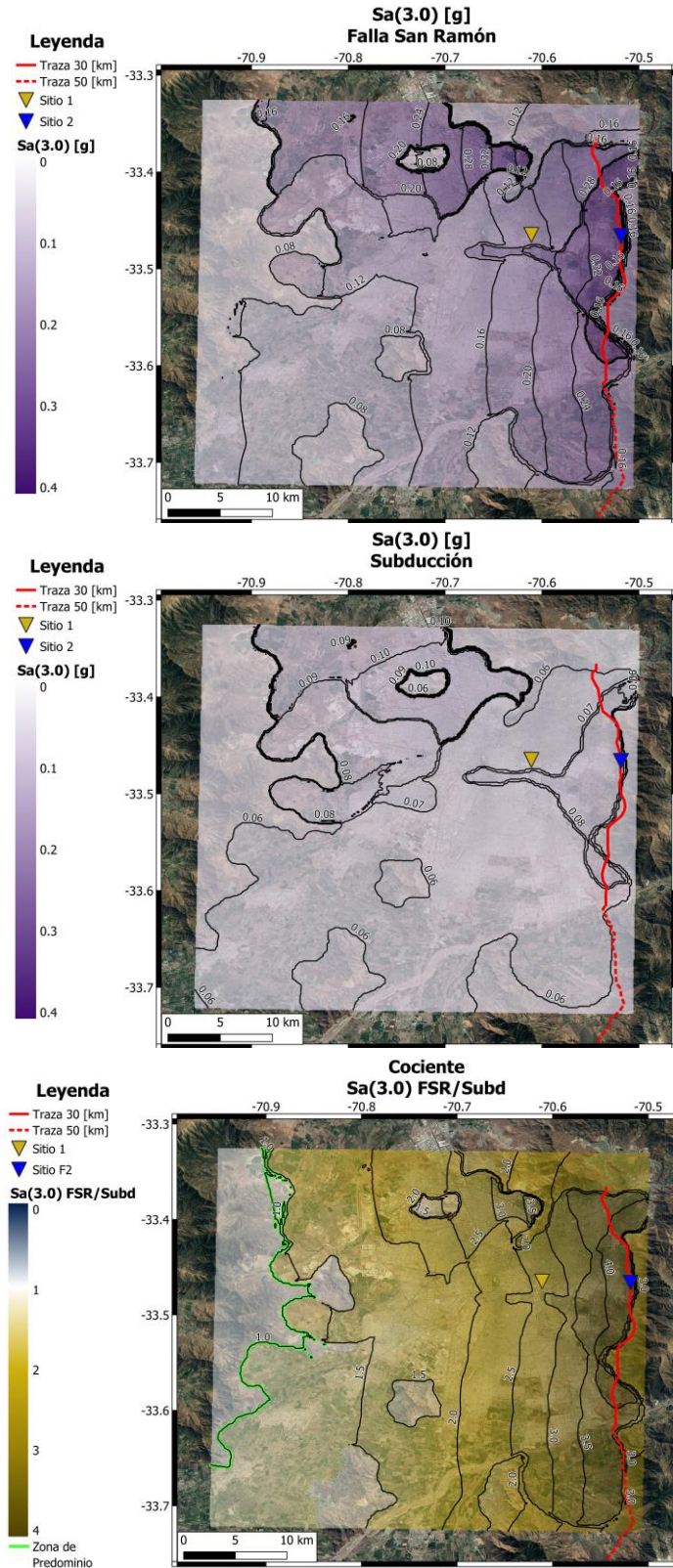


Figura A 15. Mapas de amenaza de percentil 84 de $Sa(3.0)$ obtenidos por medio de DSHA. Arriba: Mapa considerando únicamente la Falla San Ramón, $M_w 7.5$. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca $M_w 8.0$, e intraplaca $M_w 7.8$. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

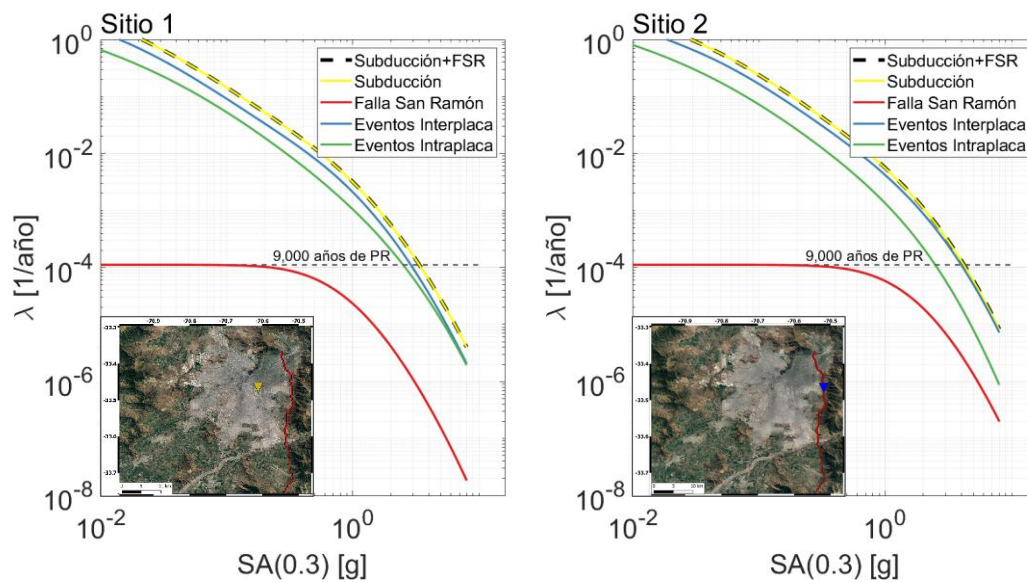


Figura A 16. Curvas de amenaza sísmica de $Sa(0.3)$ de la Falla San Ramón (rojo), eventos interplaca (azul), eventos intraplaca (verde), envoltorio de la subducción (amarillo) y envoltorio de subducción y Falla San Ramón (negra discontinua), para ambos sitios de estudio.

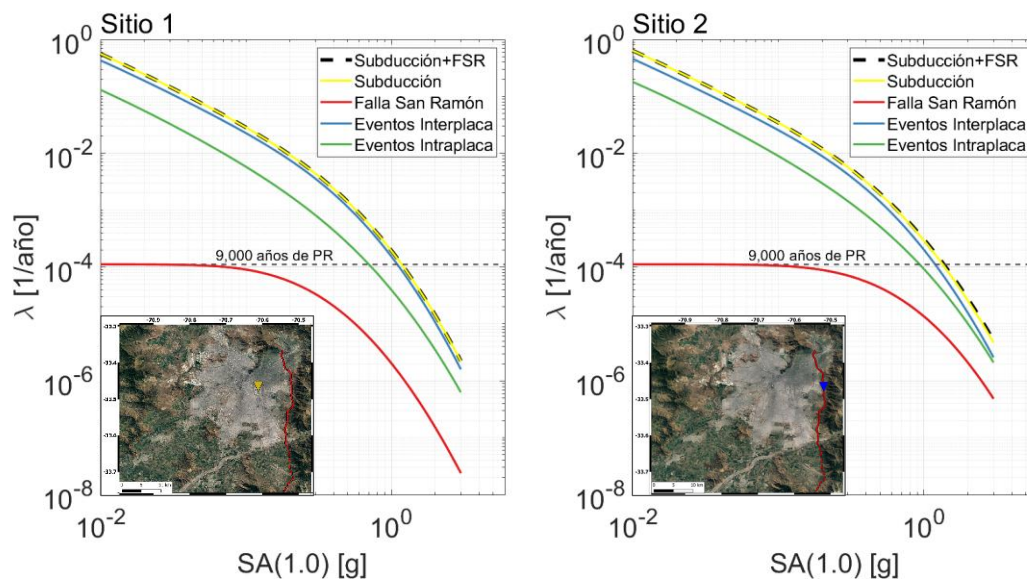


Figura A 17. Curvas de amenaza sísmica de $Sa(1.0)$ de la Falla San Ramón (rojo), eventos interplaca (azul), eventos intraplaca (verde), envoltorio de la subducción (amarillo) y envoltorio de subducción y Falla San Ramón (negra discontinua), para ambos sitios de estudio.

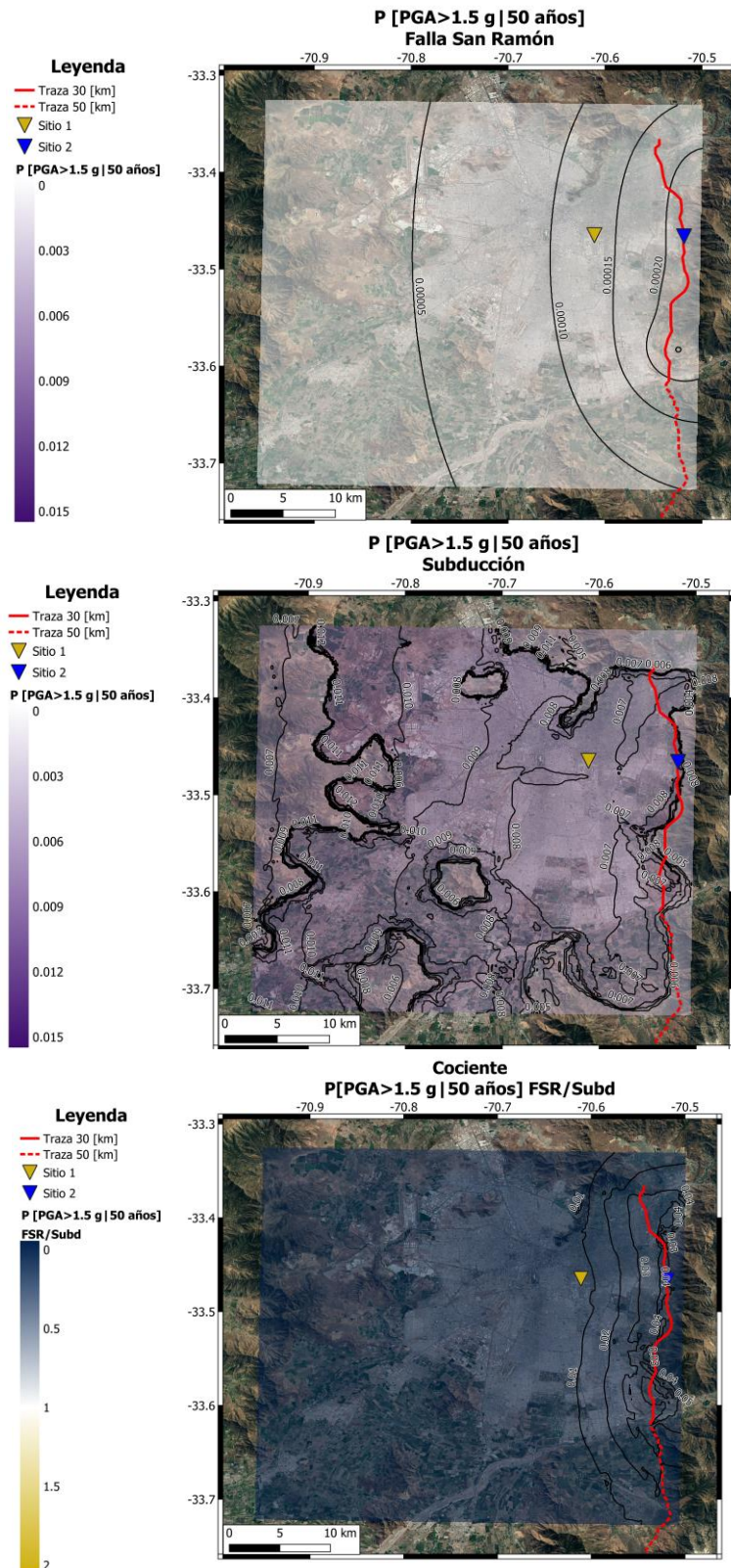


Figura A 18. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de 1.5 [g] para PGA obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaca. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

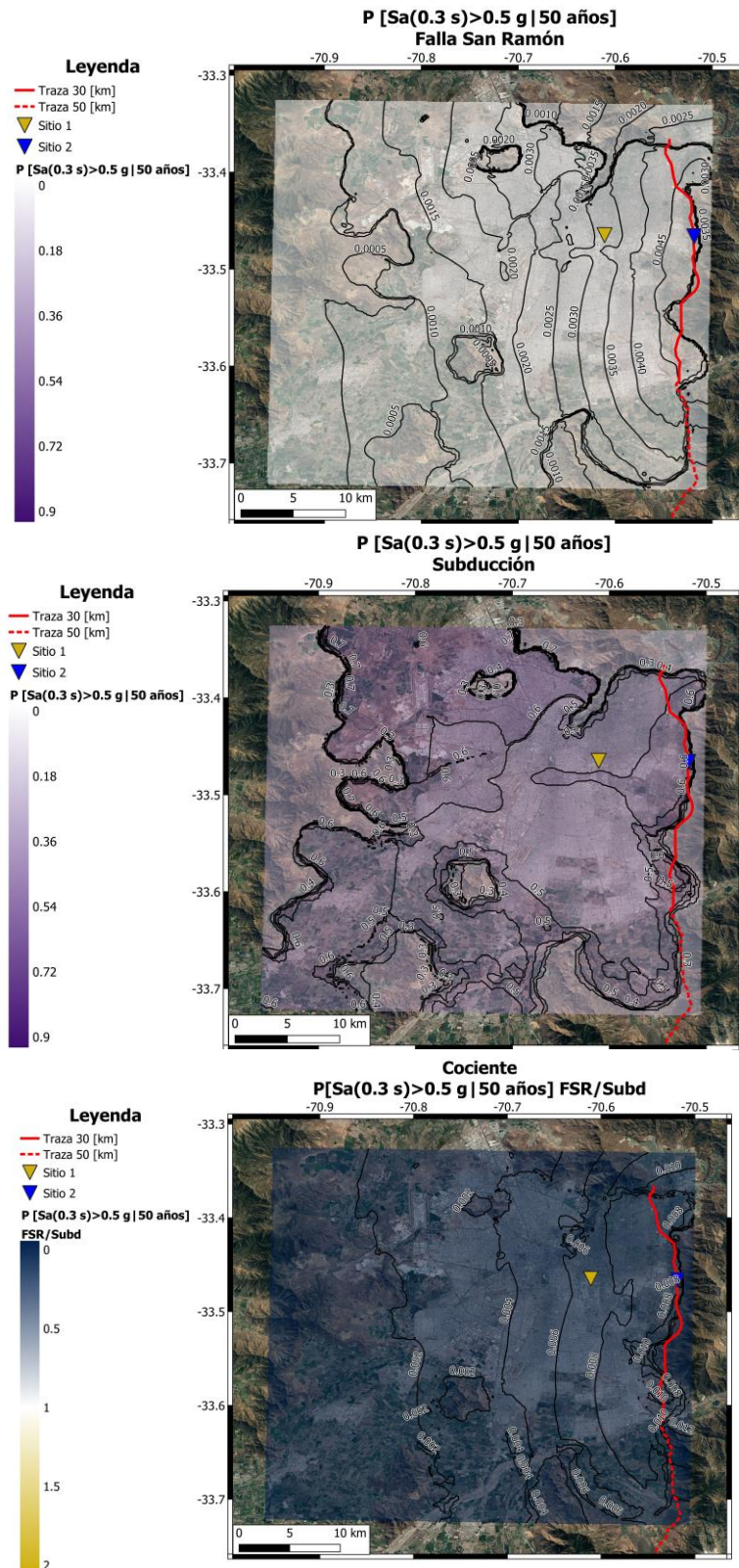


Figura A 19. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de 0.5 [g] para $Sa(0.3)$ obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaça. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

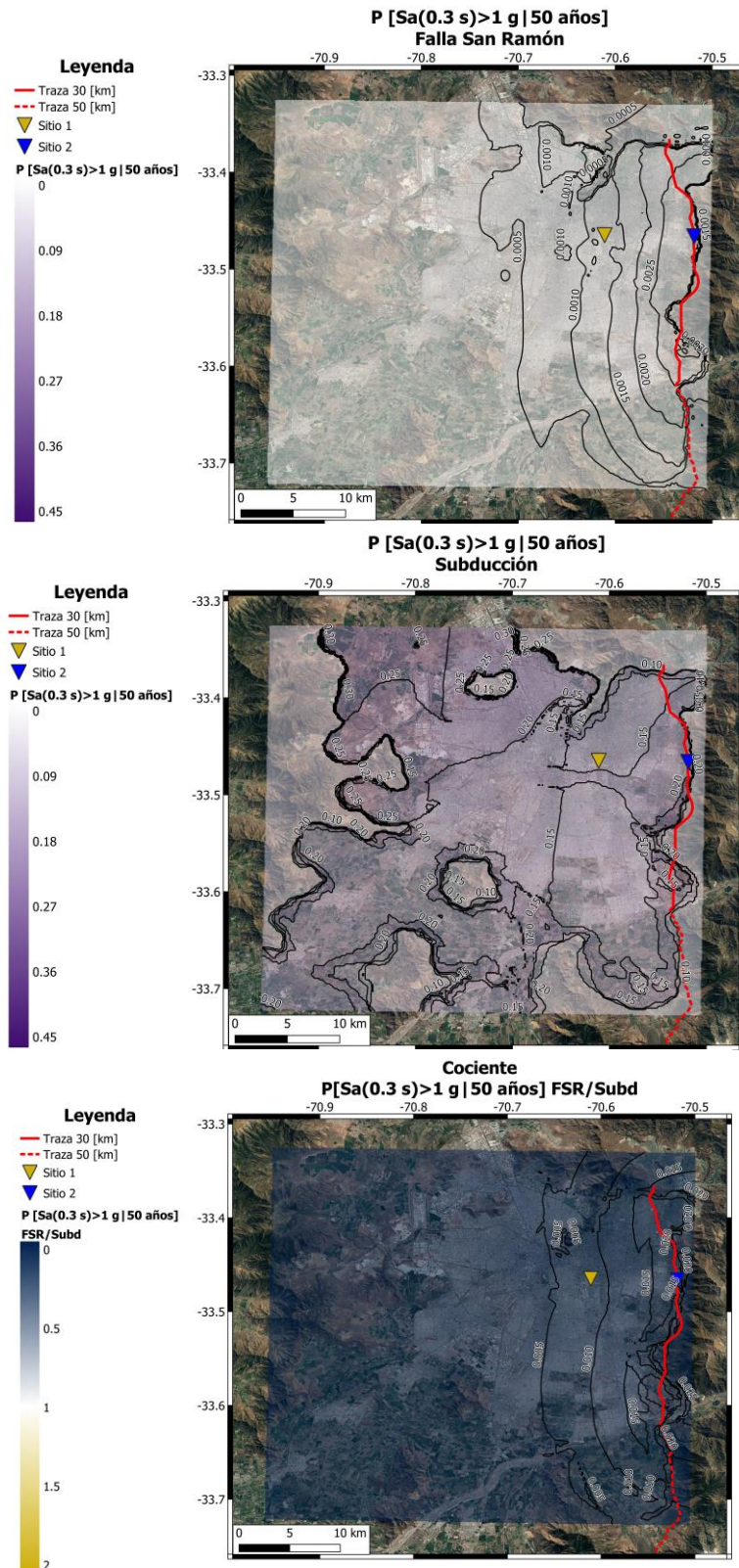


Figura A 20. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de 1.0 [g] para $Sa(0.3)$ obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaça. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

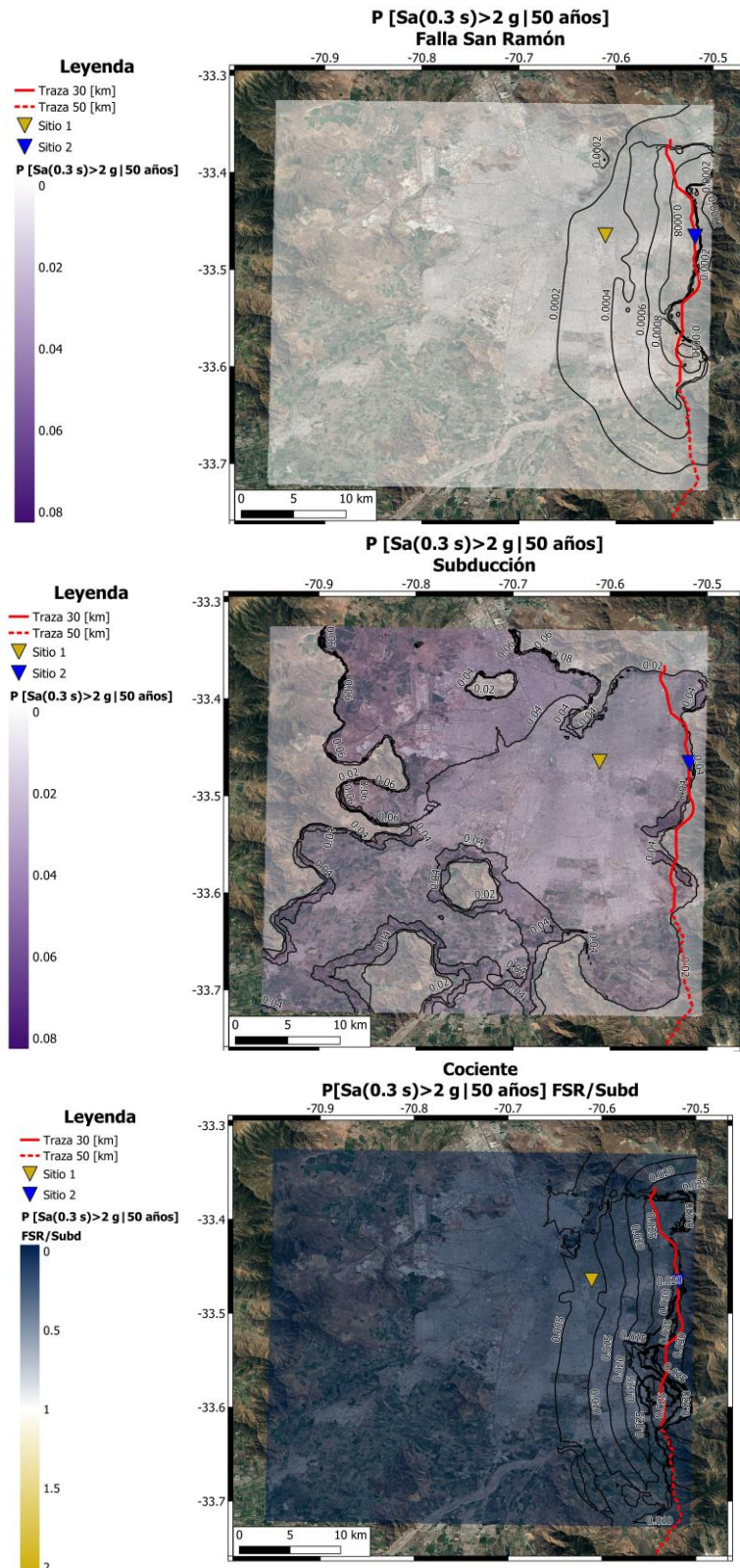


Figura A 21. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de $2.0 [g]$ para $Sa(0.3)$ obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaça. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

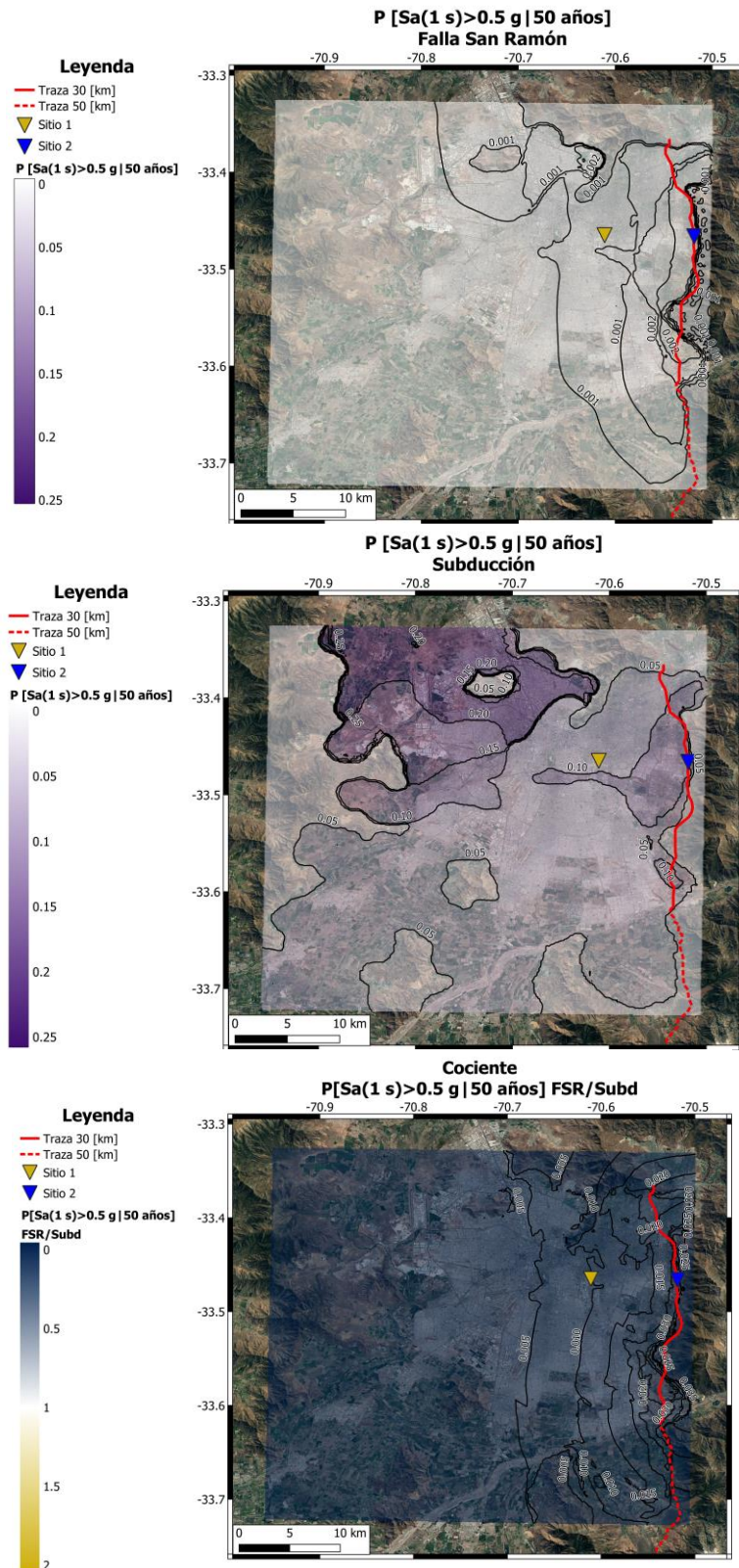


Figura A 22. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de 0.5 [g] para $Sa(1.0)$ obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaca. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

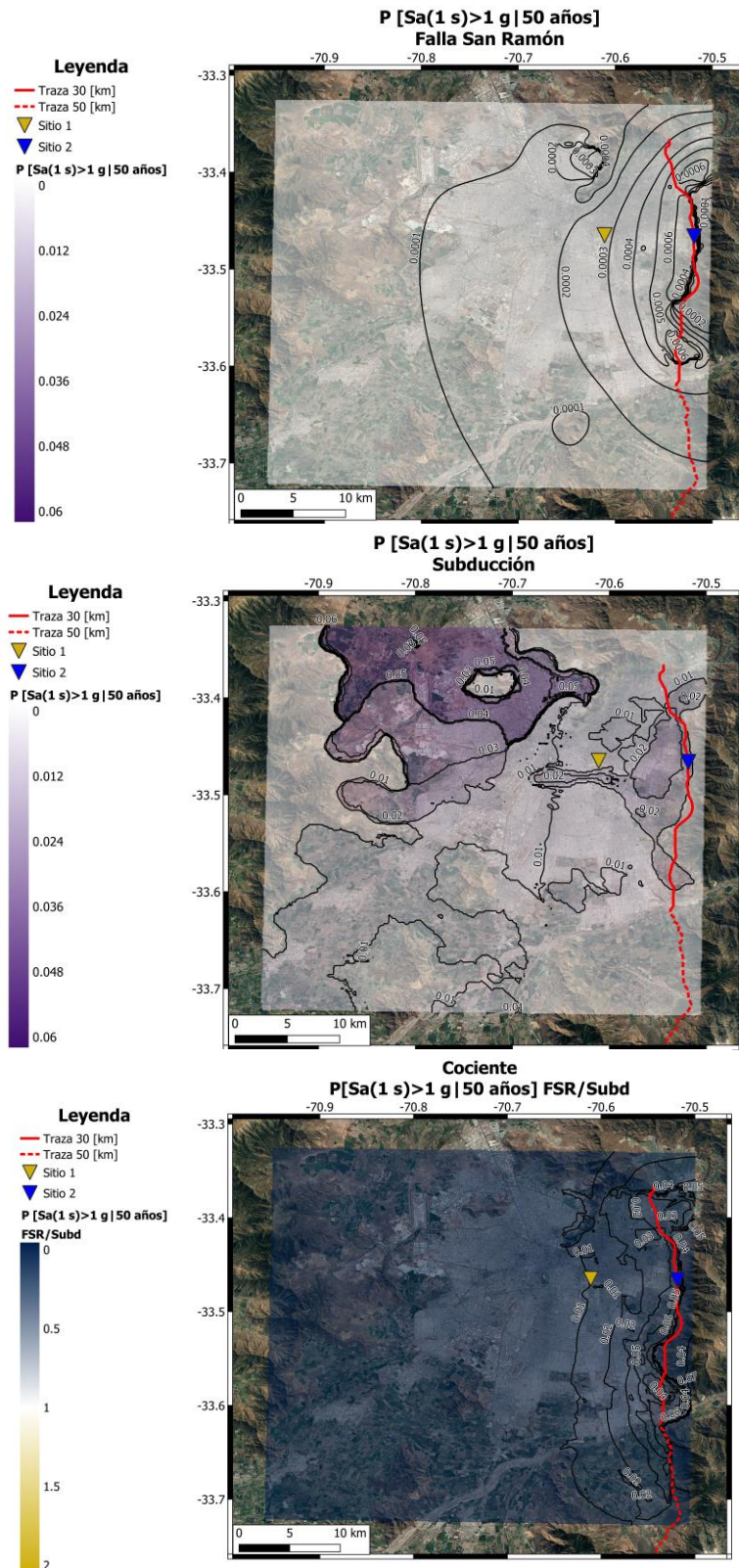


Figura A 23. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de 1.0 [g] para $Sa(1.0)$ obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaca. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

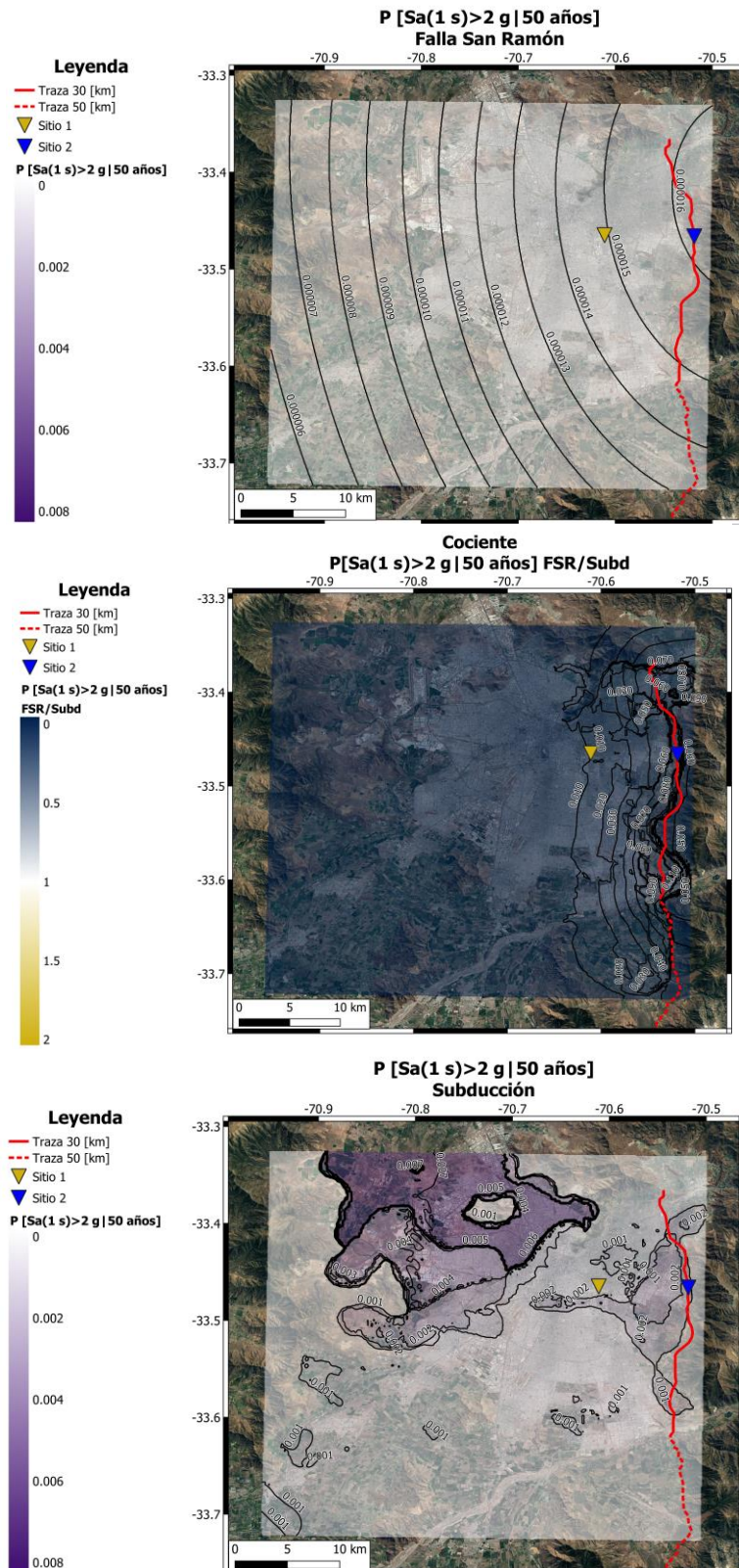


Figura A 24. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de 2.0 [g] para $Sa(1.0)$ obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaca. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.

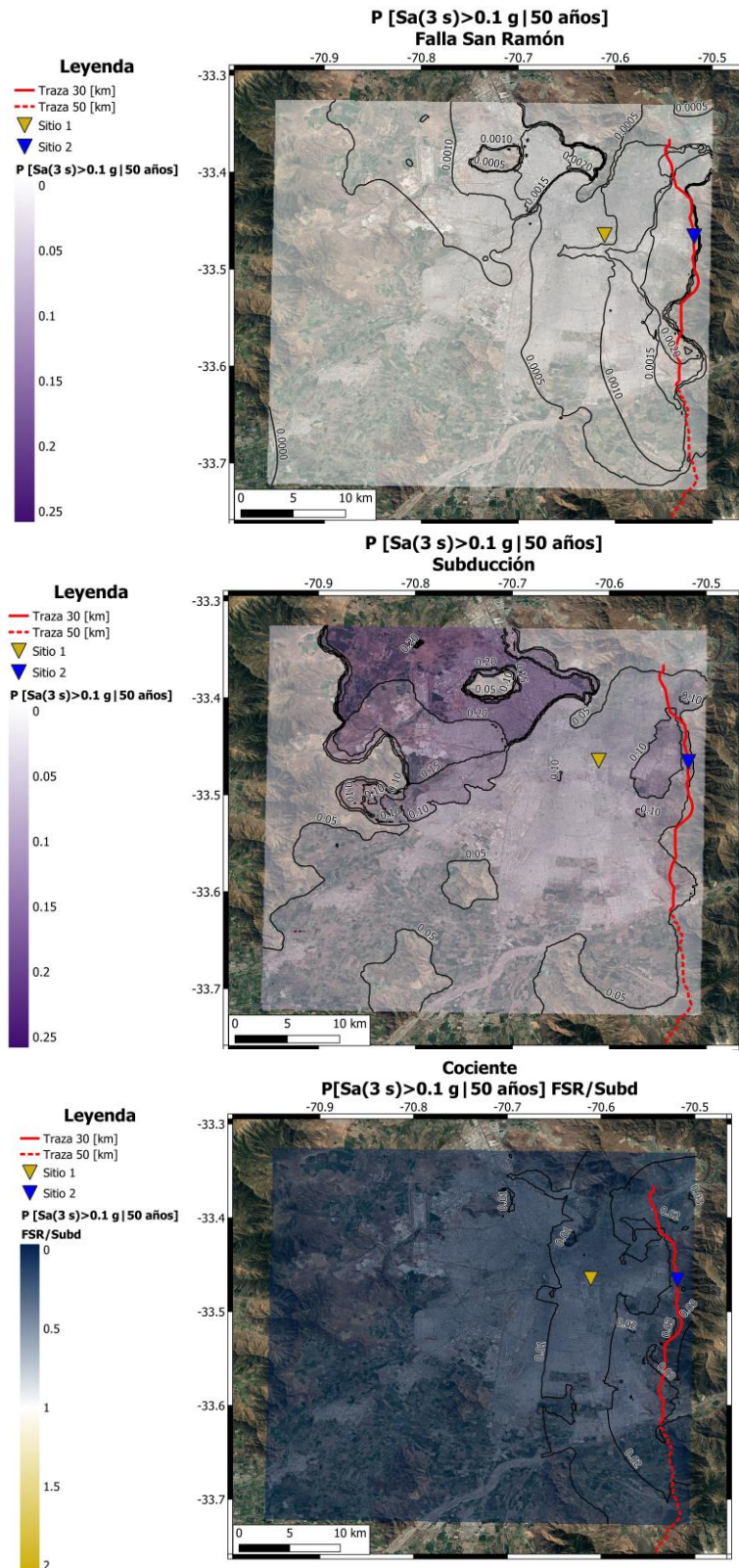


Figura A 25. Mapas de probabilidad de excedencia en 50 años de $0.1 [g]$ para $Sa(3.0)$ obtenidos por medio de PSHA. Arriba: Mapa de la Falla San Ramón. Al centro: Mapa considerando únicamente eventos interplaca e intraplaca. Abajo: Mapa de cociente entre amenaza generada por la Falla San Ramón y los eventos de subducción.