



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y
CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LA DEMANDA
SÍSMICA EN CHILE – CONTEXTO
INDUSTRIAL

Autores:

MIGUEL MEDALLA RIQUELME
CRISTIAN URZÚA ARCE
RODRIGO ASTROZA EULUFÍ

SANTIAGO, 2024

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y
CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTOS

Durante el proceso de discusión de actualización de NCh2369 en el comité INN, fueron diversos los profesionales y estudiantes que aportaron con su trabajo, consejos y experiencia al desarrollo de la evaluación de amenaza sísmica a nivel nacional resumida en el presente documento. Dentro de dicho contexto, los autores de este documento expresan un especial agradecimiento a los ingenieros Palmenio Herrera y Joaquín Palominos, por el tiempo destinado a las evaluaciones y análisis de estimación de la amenaza sísmica en Chile, así como también, expresan un afectuoso agradecimiento a los profesores Gabriel Candía y Rodolfo Saragoni, quienes con sus comentarios y experiencia permitieron un mejor desarrollo y una mejor toma de decisiones para la implementación del presente trabajo. Finalmente, agradecer al profesor Francisco Pinto por su apoyo en la redacción y diagramación del documento.

ÍNDICE GENERAL

| | | |
|----|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 2 | MARCO TEÓRICO | 3 |
| 3 | MARCO METODOLÓGICO | 8 |
| 4 | ANÁLISIS PROBABILÍSTICO | 11 |
| 5 | ANÁLISIS DETERMINÍSTICO | 15 |
| 6 | ESPECTROS DE AMENAZA | 19 |
| 7 | COMPARACIÓN CON NORMAS NACIONALES | 21 |
| 8 | ESPECTRO DE REFERENCIA Y DISEÑO PROPUESTOS PARA ACTUALIZACIÓN DE NORMA NCH2369 (VIGENTE INN 2023)..... | 24 |
| 9 | ESPECTRO RELACIÓN DE DEMANDAS HORIZONTALES PROPUESTAS VERSUS NCH2369.OF2003 | 26 |
| 10 | COMENTARIOS FINALES..... | 32 |
| 11 | REFERENCIAS | 33 |
| 12 | ANEXO 1: DELIMITACIÓN DE ZONAS SÍSMICAS Y UBICACIÓN DE CIUDADES PRINCIPALES DENTRO DE CADA REGIÓN | 36 |
| 13 | ANEXO 2: ANÁLISIS DE LA DIRECCIONALIDAD DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA DE DISEÑO CHILENO | 41 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Representación de los tipos de fuentes sismogenicas presentes en la subducción chilena (Leyton <i>et al.</i> 2010)..... | 4 |
| Figura 2. Ejemplo de desagregación de la amenaza sísmica..... | 7 |
| Figura 3. Ejemplo de formación de un UHS (Baker, 2021)..... | 7 |
| Figura 4. Espectros de Amenaza Probabilísticos por zona sísmica para las regiones Antofagasta, Metropolitana y Bio Bío..... | 13 |
| Figura 5. Espectros medianos de amenaza probabilísticos por zona sísmica y tipo de suelo, Tr de 475 años y GMM: Idini et al., 2016; Montalva et al., 2017..... | 14 |
| Figura 6. Diagrama de las desagregaciones de un sitio de interés. | 15 |
| Figura 7. Diagrama de flujo para generar un Espectro de Amenaza Determinístico | 17 |
| Figura 8. Espectros de Amenaza Determinísticos por zona sísmica y tipo de suelo, Tr de 475 años y GMM: Idini et al., 2016; Montalva et al., 2017 | 18 |
| Figura 9. Espectros Medianos de Amenaza por zona sísmica y tipo de suelo, Tr de 475 años y GMM: Idini et al., 2016; Montalva et al., 2017..... | 20 |
| Figura 10. Comparación de espectros medianos de amenaza con los espectros de diseño de las normas sísmicas chilenas | 23 |
| Figura 11. Espectro de Referencia propuesto para actualización de NCh2369..... | 25 |
| Figura 12. Espectro de Diseño Elástico propuesto para actualización de NCh2369..... | 26 |
| Figura 13. Espectro de Diseño Horizontales propuestos y NCh2369.Of2003 (<i>continúa</i>) ... | 27 |
| Figura 14. Relación demandas espectrales Espectro Propuesto y NCh2369.Of2003 (<i>continúa</i>) | 30 |
| Figura 14. Espectro de Diseño Horizontales propuestos y NCh2369.Of2003 | 31 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Sitios de interés | 10 |
| Tabla 2. Escenarios referenciales para un Tr de 475 años..... | 16 |

RESUMEN

En el contexto del proyecto de actualización de la norma chilena de diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, NCh2369, se ha desarrollado una evaluación de la amenaza sísmica a escala nacional. El propósito de esta evaluación obedece a la necesidad de contar con una definición de las demandas espectrales que permitan, de manera consistente entre sí, definir demandas de diseño, demandas de desplazamiento, seleccionar registros sísmicos consistentes con los objetivos de la normativa, así como también, establecer una base metodológica que permita estandarizar y eventualmente comparar los resultados obtenidos en proyectos industriales específicos que requieran de evaluaciones locales de la amenaza sísmica.

El análisis considera la estimación de la amenaza sísmica en 39 sitios, desde la Región de Arica y Parinacota, en el norte de Chile, hasta la región de los Lagos, en el sur. Los sitios se han definido de manera tal de contar en cada región con sitios ubicados en las distintas zonas sísmicas definidas por la normativa nacional.

Como resultado del estudio se logra observar: a) la demanda elástica de diseño definida en la normativa NCh2369.Of2003 presenta deficiencias para representar la amenaza sísmica nacional, particularmente con una subestimación en la zona de periodos cortos, b) la distribución espacial de la amenaza sísmica difiere ostensiblemente de la zonificación propuesta en la normativa; y c) la sismicidad intraplaca genera una amenaza sísmica muy superior, en zona de periodos cortos, a la definida en la normativa nacional actual (particularmente en la franja central de la zona norte del país).

De acuerdo con los resultados obtenidos se propone un espectro de referencia para propósitos de diseño al proyecto de actualización de la norma NCh2369 (vigente INN 2023).

1 INTRODUCCIÓN

Chile es un país con una alta actividad sísmica, por lo cual es necesario usar e implementar métodos y tecnologías disponibles en el estado del arte de la ingeniería sísmica, para el desarrollo y actualización de las normas de diseño sismorresistente nacionales. En este sentido, el análisis y diseño sísmico de infraestructura en gran parte de los proyectos desarrollados en Chile considera el uso de espectros de diseño de pseudo aceleración que toman en cuenta la intensidad esperada de los movimientos del suelo. En la actualidad, el estado del arte y de la práctica considera el desarrollo de espectros de pseudo aceleración a partir de Análisis Probabilísticos de Amenaza Sísmica (PSHA, por sus siglas en inglés), para lo cual se requiere una caracterización de las fuentes sismogénicas (geométrica y capacidad de generar eventos), así como también de modelos de movimientos de suelo que permitan relacionar parámetros causales del evento (magnitud, distancia, etc.) con la intensidad esperada en un sitio o zona de interés. En este sentido, Chile, gracias al desarrollo e implementación de una red de estaciones acelerográficas muy superior a la existente hace algunas décadas, cuenta con una base de datos de registros sísmicos de mediana y gran intensidad (por ejemplo, terremoto $M_w = 8.4$ de Coquimbo en 2015, terremoto $M_w = 8.2$ de Iquique en 2014, terremoto $M_w = 8.8$ de Maule en 2010) que ha impulsado la generación de nuevos modelos de caracterización de sismicidad (Poulos *et al.*, 2019); así como también, de nuevos modelos de movimiento del suelo (Montalva *et al.*, 2017; Idini *et al.*, 2016; Contreras y Boroschek 2012, etc.). Estos avances han permitido la realización de estudios formales de PSHA de acuerdo al estado del arte y abren la posibilidad de generar estudios para la actualización de los espectros de diseño presentes en las normas chilenas, en particular para la NCh2369 Of.2003 (INN, 2003), ya que los presentes en ella no obedecen a definiciones formales de PSHA, sino más bien, al comportamiento que las estructuras han exhibido luego de un número limitado de eventos ocurridos y registros sísmicos previo a los años 90.

En vista de lo anterior, el presente trabajo presenta un análisis de amenaza sísmica a nivel nacional que se basa en las metodologías disponibles en el estado del arte, y compara sus resultados con la normativa sísmica industrial NCh2369 Of.2003 (INN, 2003), en términos de espectros elásticos de diseño. Así mismo, compara los espectros de pseudo aceleraciones obtenidos con los espectros de diseño presentes en otras normas chilenas, como son la NCh433 Of.1996 (INN, 2009) y la NCh2745 Of.2013 (INN, 2013), y se realiza un análisis de la distribución de la amenaza sísmica a lo largo de Chile. Por último, en los anexos de este trabajo se muestra un estudio sobre la evaluación de las relaciones entre distintas definiciones direccionales de espectros de amenaza uniforme en Chile.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ESTADO DEL ARTE DEL ANÁLISIS DE AMENAZA SÍSMICA

La evaluación de la amenaza sísmica para el análisis y diseño de estructuras está evolucionando hacia un enfoque probabilístico con el fin de evitar subjetividades que suponen los tradicionales enfoques determinísticos (Baker, 2013; Kramer, 1996). Los análisis probabilísticos de amenaza sísmica (PSHA, por su sigla en inglés) permiten integrar de manera rigurosa las fuentes de incertidumbre intrínsecas del fenómeno sísmico, minimizando la componente subjetiva que presentan los modelos deterministas, a través de un enfoque teórico más robusto. Por otra parte, la comunidad científica e ingenieril de Chile, reconociendo la importancia de contar con una mayor cantidad de información sobre terremotos de gran magnitud, ha estimulado el crecimiento de la base de datos de registros sísmicos, lo que ha impulsado el desarrollo y actualización de modelos de movimiento del suelo (GMM, por sus siglas en inglés) definidos para la realidad sísmica nacional.

2.1.1 Análisis Determinístico de Amenaza Sísmica (DSHA)

El análisis determinístico se basa en encontrar un escenario único de interés del movimiento del suelo para evaluar la amenaza sísmica, presentando como desventaja los siguientes aspectos: (1) no incorpora la variabilidad de los eventos sísmicos, (2) no considera información estadística que represente la variabilidad en la intensidad del movimiento del suelo, (3) posee poca a nula capacidad para definir escenarios sísmicos posibles a los cuales se puede estar enfrentando un conjunto de estructuras (Baker, 2013).

2.1.2 Análisis Probabilístico de Amenaza Sísmica (PSHA)

El PSHA, contrario al análisis determinístico, considera una serie de eventos sísmicos posibles, y sus correspondientes incertidumbres, para estimar una intensidad de movimiento del suelo que tenga una probabilidad definida de ser excedida. Las etapas de este método son las siguientes:

- a) Identificar y caracterizar todas las fuentes de terremotos presentes en la zona de interés.
- b) Caracterizar la sismicidad o distribución temporal de la recurrencia de los terremotos.
- c) Estimar la distribución de las intensidades del movimiento del suelo a través de los GMM, utilizando parámetros causales tales como: magnitud, distancia a la ruptura, características del suelo, entre otros.
- d) Combinar las incertidumbres asociadas al tamaño del terremoto y la distancia desde la fuente al sitio, con la finalidad de determinar la probabilidad de que una medida de intensidad pueda ser excedida durante un periodo de tiempo predefinido.

En el caso particular de Chile, cada una de estas etapas se puede abordar considerando información reciente y determinada en base a las características sísmicas particulares del país. En este sentido se tiene:

2.1.2.1 Identificación y caracterización de las fuentes de terremotos en Chile

Una fuente sismogénica es una zona o lugar donde ocurren terremotos dada sus singularidades geológicas y tectónicas. En el caso particular de Chile, las fuentes sismogénicas identificadas que generan peligro o amenaza son:

- a) Sismicidad interplaca: producida en el contacto entre las placas Sudamericana y de Nazca, extendiéndose desde la fosa hasta unos 50 a 60 km de profundidad (Tichelaar y Ruff, 1993; Suárez y Comte, 1993; Belmonte-Pool, 1997).
- b) Sismicidad intraplaca de profundidad intermedia: comprende aquella actividad que ocurre dentro de la placa de Nazca. Las profundidades focales de interés en general se definen entre 60 km a 150 km, aproximadamente, ya que históricamente no se han observado en Chile daños producidos por sismos de mayor profundidad (Leyton et al., 2010).
- c) Sismicidad cortical: es aquella sismicidad que ocurre en el interior de la placa Sudamericana, principalmente en los sectores precordilleranos y cordilleranos, ubicándose a profundidades menores a 30 km (Leyton et al., 2010).
- d) Sismicidad “*outer-rise*”: producida por la flexión de la placa de Nazca previa a la subducción. Es caracterizada por generar eventos de magnitud moderada a distancias mayores a 150 km de la costa (Leyton et al., 2010) y, por lo tanto, en general no son de relevancia en la estimación de la amenaza sísmica en el territorio continental.

La Figura 1 muestra una representación de los tipos de mecanismos de falla existentes en Chile.

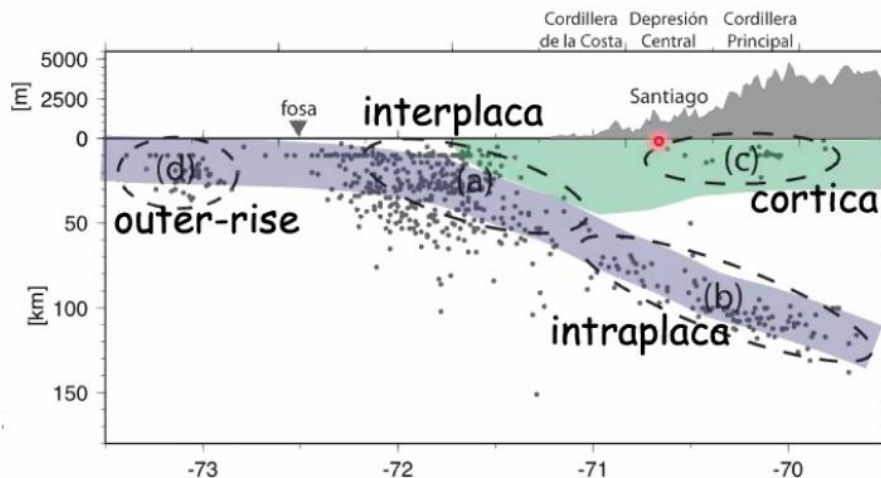


Figura 1. Representación de los tipos de fuentes sismogénicas presentes en la subducción chilena (Leyton et al. 2010)

2.1.2.2 Relación de recurrencia de los sismos en Chile

Una relación de recurrencia es aquella que permite cuantificar la relación entre periodicidad y magnitud de la actividad sísmica de una determinada región. Poulos *et al.* (2019) propusieron recientemente un nuevo modelo de recurrencia para Chile que se basa en la ley Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter, 1944). El modelo de Poulos *et al.* (2019) divide a Chile en 7 zonas con distintos valores para los parámetros que definen la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter (a , b , m_{max} y m_{min}).

2.1.2.3 Modelo de Movimiento del Suelo (GMM)

Los GMM, antes llamados leyes de atenuación, permiten determinar la intensidad de un parámetro de movimiento del suelo dado un escenario, considerando variables como la magnitud del terremoto, la distancia entre la ruptura al sitio, el tipo de fuente sismogénica, condiciones de sitio o propiedades del suelo superficial, entre otras. Estos modelos se generan a través de regresiones que consideran una gran cantidad de registros de eventos sísmicos documentados. El catálogo de eventos sísmicos de Chile presenta un número razonable de registros que ha permitido generar GMM adecuados a las condiciones sísmicas del país (por ejemplo, Montalva *et al.*, 2017, Idini *et al.*, 2016 y Contreras y Boroschek, 2012).

2.1.2.4 Obtención de la probabilidad de intensidad del movimiento del suelo

El PSHA se define mediante el teorema de probabilidad total y considera la información definida a partir de los puntos 2.1.2.1, 2.1.2.2 y 2.1.2.3. La probabilidad de superar una intensidad dada (x) para un parámetro de movimiento del suelo se puede plantear mediante la Ecuación (1).

$$P(IM > x) = \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x|m, r) f_M(m) f_R(m) dr dm \quad (1)$$

Donde IM, es la medida de intensidad del parámetro de movimiento del suelo que se quiere evaluar, $P(IM > x|m, r)$ es la probabilidad de que IM sobrepasa x dada una magnitud (m) y distancia a la fuente (r), que se obtiene a partir de los GMM (ver sección 2.1.2.3). $f_M(m)$ y $f_R(m)$ son las distribuciones para la magnitud y la distancia, respectivamente, y se estiman a partir de las relaciones de recurrencia de los sismos (ver sección 2.1.2.2).

Agregando a la Ecuación (1) la tasa de ocurrencia anual de terremotos mayores a una magnitud m_{min} asociada con una fuente en particular, se obtiene la tasa de ocurrencia anual de un determinado IM asociado a la fuente de interés, como se muestra en la Ecuación 2.

$$\lambda(IM > x) = \lambda(M > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x|m, r) f_M(m) f_R(m) dr dm \quad (2)$$

En presencia de varias fuentes sismogénicas afectando al sitio de interés, se pueden sumar todas las tasas de $IM > x$ asociadas a las distintas fuentes, lo cual se expresa a través de la Ecuación 3. λ se conoce como la media anual de excedencia y la evaluación de esta para distintos niveles de interés x permite la construcción de las curvas de amenaza para un determinado sitio.

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_s} \lambda(M_i > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x | m, r) f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dr dm \quad (3)$$

2.1.2.5 Desagregación

La desagregación consiste en identificar la contribución relativa de diferentes fuentes de sismos y magnitudes a la razón de excedencia de una intensidad del movimiento del suelo. Una de las características favorables de los modelos de desagregación es que permiten construir escenarios determinísticos, consistentes con niveles de intensidad objetivos, en base a una justificación técnica, evitando caer en definiciones subjetivas de dichos escenarios.

A través de los modelos de desagregación es posible, por ejemplo, evaluar la probabilidad de que una magnitud m genere un movimiento del suelo con $IM > x$ a través de la Ecuación 4.

$$P(M = m | IM > x) = \frac{\lambda(IM > x, M = m)}{\lambda(IM > x)} \quad (4)$$

También es posible estimar distribuciones conjuntas condicionales de magnitudes M y distancias R a través de la Ecuación 5.

$$P(M = m, R = r | IM > x) = \frac{\lambda(IM > x, M = m, R = r)}{\lambda(IM > x)} \quad (5)$$

A modo de ejemplo se presenta la Figura 2 que representa la desagregación (M, R) de un sitio en el centro norte de Chile.

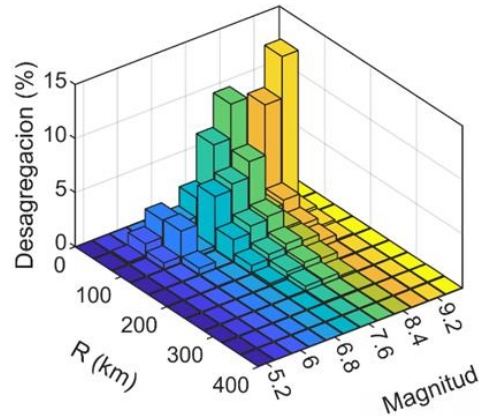


Figura 2. Ejemplo de desagregación de la amenaza sísmica

2.1.2.6 Espectro de amenaza uniforme (UHS)

El UHS (por su sigla en inglés) se define como la forma espectral en donde todas las coordenadas espectrales tienen la misma probabilidad de ser excedidas. La construcción de un UHS implica realizar un análisis de PSHA para aceleraciones espectrales en un rango de periodos de interés. Luego, se elige una excedencia objetivo y para dicha excedencia, y los distintos periodos de interés, se registra la correspondiente amplitud de aceleración espectral. Finalmente, estas amplitudes de aceleraciones espectrales son graficadas versus sus periodos, como se puede observar en la Figura 3.

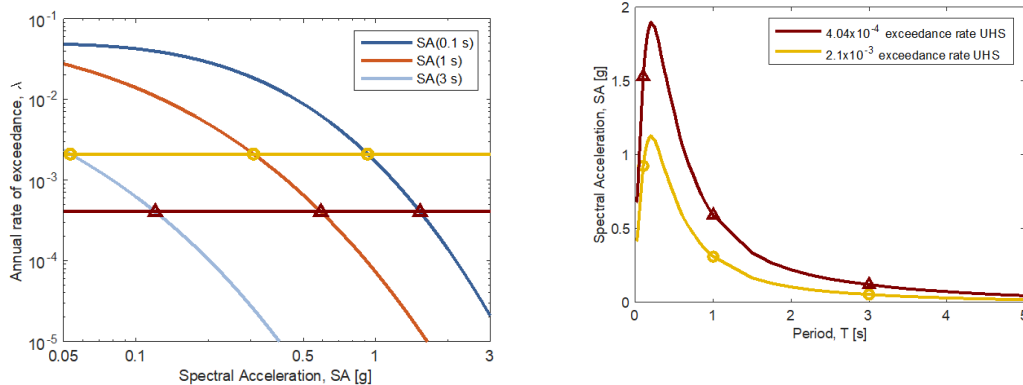


Figura 3. Ejemplo de formación de un UHS (Baker, 2021)

2.1.3 Árboles Lógicos

Los árboles lógicos son herramientas de decisión para manejar la incertidumbre epistémica existente en la evaluación del PSHA. Los árboles lógicos son considerados en la evaluación de la amenaza a través de la asignación de pesos ponderadores para los distintos GMM considerados durante la evaluación de la amenaza sísmica. La definición estricta de estos pesos es comúnmente desarrollada a través de axiomas de Kolmogorov, lo que implica que diferentes modelos deberían ser mutuamente exclusivos y colectivamente exhaustivos

(criterio MECE). En la práctica esta definición es difícil de cumplir dada la exclusividad mutua que deben tener los modelos, producto de la interdependencia que existe entre ellos, al provenir de bases de datos similares.

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1 ESPECTRO DE DISEÑO BASADO EN AMENAZA

A continuación, se describe el procedimiento desarrollado para la construcción de espectros de amenaza a nivel nacional siguiendo la práctica internacional en estudios de amenaza. Esto es, definir espectros de diseños basados en una amenaza probabilística limitada a un escenario determinístico (comúnmente definido como el percentil 84 de la pseudo aceleración).

3.2 CONSTRUCCIÓN DE ESPECTROS DE AMENAZA

Con el objetivo de generar los Espectros de Amenaza y compararlos con los espectros de diseño que se presentan en las normas chilenas, se seleccionan sitios de interés para la estimación de la amenaza sísmica. En este estudio se considera la zonificación sísmica que propone NCh2369Of.2003 (INN, 2003) y se seleccionan sitios para cada zona sísmica de cada región de Chile. Además, para cada sitio de estudio se considera la clasificación de suelos A, B, C y D de la norma NCh433 (INN, 2009) y DS60 (INN, 2011). Esta consideración obedece al acuerdo tomado por el comité técnico del Instituto Nacional de Normalización (INN) conformado para la actualización de NCh2369 (INN, 2003), en donde se ha decidido actualizar la clasificación de suelos de NCh2369.Of2003 (INN, 2003).

Finalmente, el procedimiento considerado en el presente estudio, para la generación de los espectros de amenaza, se establece a continuación:

- A través de la zonificación sísmica que propone NCh2369.Of2003 (INN, 2003), se selecciona una ciudad por cada región y zona sísmica (p.ej., para la zona 3 de la región de Arica y Parinacota se elige la ciudad de Arica).
- Se eligen los modelos de recurrencia (por ejemplo, Poulos *et al.*, 2019) y se seleccionan los GMM a emplear (por ejemplo, Montalva *et al.*, 2017, Idini *et al.*, 2016).
- De acuerdo con los distintos GMMs seleccionados, se define un árbol lógico que fije los “pesos” de cada modelo para las distintas evaluaciones.
- Se desarrolla un estudio de PSHA para cada sitio de interés y se establece un espectro UHS para cada uno de ellos. En este documento, se presentan dos periodos de retorno medios (T_r) objetivos, 475 años y 2475 años, lo que corresponde a 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años, respectivamente.
- Para 2 periodos naturales (0.2 s y 1.0 s) se desagregan los parámetros causales M y R para cada uno de los análisis previos.
- Para los escenarios (M,R) obtenidos, se evalúan los GMM y se crean espectros de amenaza determinísticos, que correspondan a los espectros percentil 84th de los dos periodos de vibración evaluados.

- Los espectros de amenaza obtenidos a partir del análisis probabilístico y determinístico se comparan con la finalidad de definir los espectros de amenaza definitivos.

3.3 ZONAS DE ESTUDIO

Considerando sitios de interés industrial y/o demográficos se procede a definir los sitios para cada región de interés. Se excluyeron las regiones de Aysén y Magallanes, dada la escasa información formal de la condición sismotectónica de estas zonas, así como también el escaso desarrollo industrial presente en ellas. La Tabla 1 presenta en orden descendente los sitios de interés seleccionados para cada zona sísmica desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Los Lagos. La Tabla 1 se puede acompañar con las Figuras A1.1, A1.2, A1.3, A1.4 y A1.5 en el Anexo 1, las que permiten identificar los sitios seleccionados y la zona sísmica a la que pertenecen.

Tabla 1. Sitios de interés

| N° de Región | Región | Zona sísmica | Sitio de interés |
|--------------|--------------------|--------------|---|
| XV | Arica y Parinacota | 1 | Parinacota |
| | | 2 | Putre |
| | | 3 | Arica |
| I | Tarapacá | 1 | Colchane |
| | | 2 | Pica |
| | | 3 | Iquique |
| II | Antofagasta | 1 | Toconao |
| | | 2 | Calama |
| | | 3 | Antofagasta |
| III | Atacama | 1 | Parque Nacional Nevado de Tres Cruces ¹⁾ |
| | | 2 | El Salvador |
| | | 3 | Huasco |
| IV | Coquimbo | 1 | N.A. ²⁾ |
| | | 2 | Junta del Toro |
| | | 3 | Salamanca |
| V | Valparaíso | 1 | N.A. ²⁾ |
| | | 2 | Los Andes |
| | | 3 | Valparaíso |
| RM | Metropolitana | 1 | Lo Valdés ¹⁾ |
| | | 2 | Santiago |
| | | 3 | Alhué o San Pedro |
| VI | O'Higgins | 1 | Termas del flaco ¹⁾ |
| | | 2 | Machalí |
| | | 3 | Santa Cruz |
| VII | Maule | 1 | Cerro Azul ¹⁾ |
| | | 2 | Curicó |
| | | 3 | Talca |
| VIII | Bío Bío | 1 | Termas de Chillán ¹⁾ |
| | | 2 | Los Ángeles |
| | | 3 | Concepción |
| IX | Araucanía | 1 | Pucón |
| | | 2 | Temuco |
| | | 3 | Purén |
| XIV | Los Ríos | 1 | Rupameica |
| | | 2 | Paillaco |
| | | 3 | Valdivia |
| X | Los Lagos | 1 | Chaitén |
| | | 2 | Osorno |
| | | 3 | Fresia |

Notas: 1) Se considera el lugar más "emblemático" de la zona, ya que NCh2369.Of2003 (INN, 2003) no indica una ciudad en particular.

2) No existe sitios dentro de dicha clasificación en la zona sísmica considerada.

4 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

En este capítulo se determinan espectros de amenaza probabilísticos para los sitios de interés planteados en el Capítulo 2.

4.1 MODELO DE RECURRENCIA

El modelo de recurrencia empleado en el presente estudio corresponde al propuesto por Poulos *et al.*, 2019. Este modelo de recurrencia considera la base de datos más actualizada y de mayor cantidad de registros sísmicos del país.

4.2 MODELOS DE MOVIMIENTOS DE SUELO (GMM)

Se emplean los GMM de Montalva *et al.*, 2017 e Idini *et al.*, 2016, ya que estos modelos utilizan registros sísmicos chilenos actualizados y consideran en su base de datos los últimos grandes terremotos ocurridos en el país (por ejemplo, 2010 $M_w = 8.8$ Maule, 2014 $M_w = 8.1$ Iquique, y 2015 $M_w = 8.3$ Illapel). Además, agrupan tanto terremotos intraplaca como interplaca, tienen un rango amplio de aceleraciones espectrales y utilizan formas funcionales actualizadas que no simplifican los efectos de sitio. Para utilizar ambos GMM, se ha creado un árbol lógico en el que tienen el mismo peso.

4.3 FRECUENCIA ANUAL DE EXCEDENCIA O PERIODO DE RETORNO (T_r)

En este documento se presentan los resultados obtenidos para T_r de 475 y 2475. La decisión de considerar estos periodos de retorno está fundamentada en los siguientes aspectos de la práctica ingenieril y normativa alrededor del mundo:

- 1) La mayoría de las normas y criterios de diseño sísmicos, incluida la práctica chilena, han definido los movimientos del suelo asociados a un periodo de retorno medio de 475 años, como las demandas o niveles de intensidad para propósitos de diseño estándar de estructuras.
- 2) La práctica internacional (por ejemplo, ASCE/SEI 7-16) define un nivel de intensidad máximo considerado como aquel movimiento del suelo que presenta una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años ($T_r = 2475$ años).

Aun cuando este documento presenta los resultados relacionados a 475 y 2475 años de periodo de retorno medio, los principales comentarios y conclusiones se desarrollan para T_r de 475 años, dado que la práctica nacional industrial ha definido este nivel como el nivel de diseño.

4.4 PLATAFORMA PARA EVALUACIÓN DE ANÁLISIS DE AMENAZA PROBABILÍSTICO

Los resultados presentados en este documento resumen las estimaciones realizadas por el grupo de trabajo, luego del desarrollo de una plataforma de automatización para la estimación de la amenaza sísmica a nivel nacional. Estas estimaciones fueron posteriormente

contrastadas con los resultados obtenidos de la plataforma SeismicHazard (Candia *et al.*, 2019), logrando en general resultados consistentes entre sí.

4.5 ESPECTROS DE AMENAZA PROBABILÍSTICOS

Se construyen 624 espectros de amenaza, los cuales comprenden los siguientes escenarios de interés para Chile:

- 13 regiones de Chile.
- 3 zonas sísmicas.
- 4 tipos de suelo (A, B, C y D).
- 2 periodos de retorno (475 y 2475 años).
- 2 conjuntos de GMM (Idini *et al.*, 2016 y Montalva *et al.*, 2017).

La Figura 4 muestra los distintos espectros de amenaza probabilísticos para las regiones de Antofagasta, Metropolitana y Biobío como ejemplos representativos del norte, centro y sur del país.

4.6 ESPECTROS MEDIANOS PROBABILÍSTICOS

De acuerdo con la filosofía de los espectros de diseño establecidos en las normas chilenas, que varían según la zona sísmica y el tipo de suelo, en la Figura 5 se presentan los espectros de amenaza medianos y medianos más una desviación estándar (comúnmente denominados como percentil 84) para cada zona sísmica. Estos espectros tienen en cuenta los resultados obtenidos para períodos de retorno de 475 años y para un árbol lógico que considera los mismos ponderadores para Idini *et al.*, 2016 y Montalva *et al.*, 2017, tal como se ha mencionado previamente.

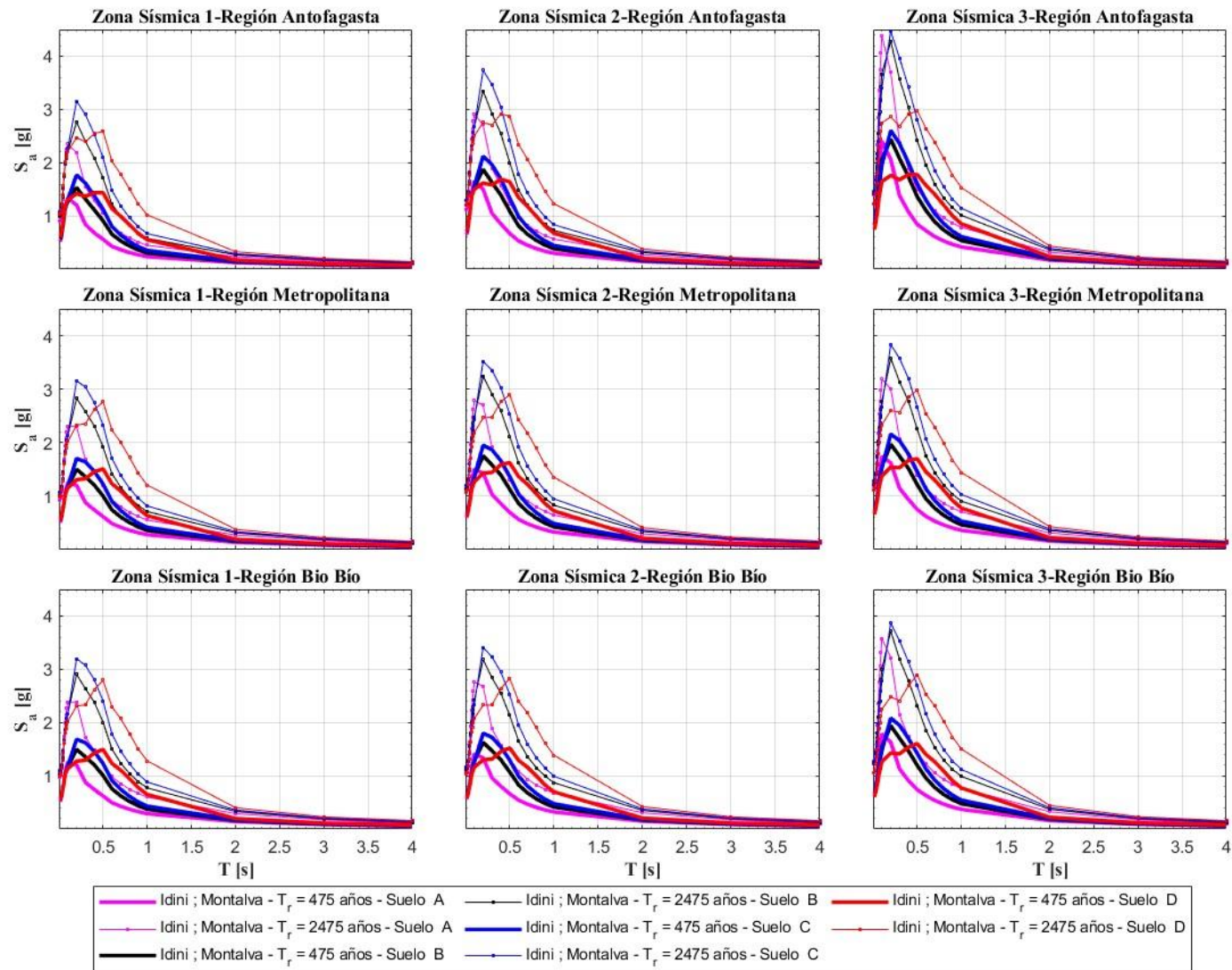


Figura 4. Espectros de Amenaza Probabilísticos por zona sísmica para las regiones Antofagasta, Metropolitana y Bio Bío.

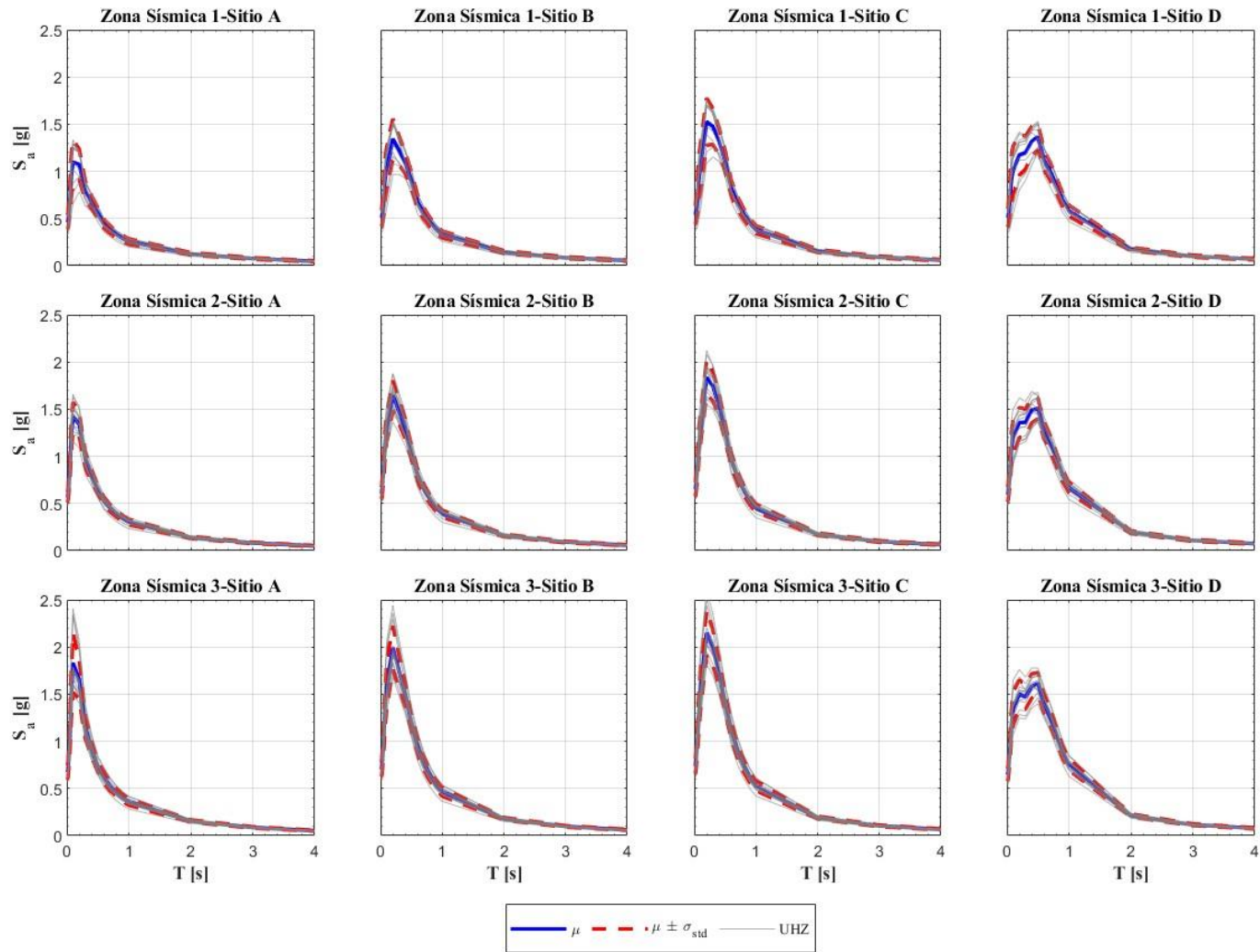


Figura 5. Espectros medianos de amenaza probabilísticos por zona sísmica y tipo de suelo, T_r de 475 años y GMM: Idini *et al.*, 2016; Montalva *et al.*, 2017.

5 ANÁLISIS DETERMINÍSTICO

Este capítulo presenta los espectros de amenaza de las zonas de estudio a través de un DSHA, Se define como escenario de interés el terremoto máximo considerado de acuerdo con el ASCE/SEI 7-16, que incluye los requisitos para un DSHA.

5.1 ESTIMACIÓN DE ESCENARIOS

Se ha determinado que un escenario adecuado para generar un DSHA se obtiene a partir de la desagregación de un PSHA (Análisis Probabilístico de Amenaza Sísmica). Se considera como referencia al documento técnico ASCE/SEI 7-16, que establece periodos espectrales de 0.2 y 1.0 s para la evaluación de amenazas probabilísticas. En este caso, estos son evaluados en los GMMs para luego formar espectros de amenaza que se analizan conjuntamente (a través de los árboles lógicos) para obtener un único espectro con los valores máximos esperados de aceleración espectral para cada período. Se debe tener en cuenta que los GMMs son estudiados de manera independiente. En otras palabras, para el suelo tipo A de la zona 1 de la región Biobío, considerando un periodo de retorno medio de 475 años, se realizan 4 desagregaciones: una por cada periodo para cada GMM. En la Figura 6 muestra lo anterior.

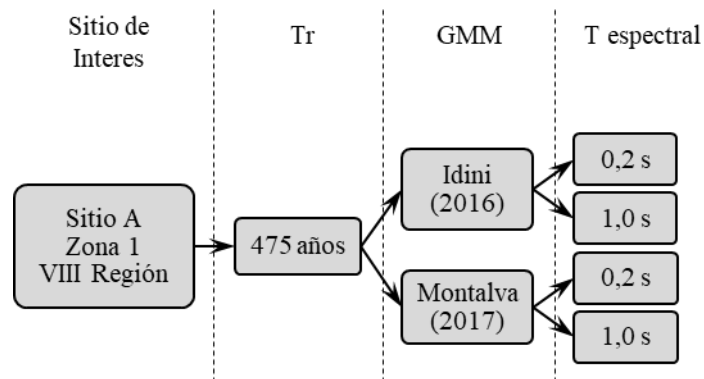


Figura 6. Diagrama de las desagregaciones de un sitio de interés.

En la evaluación del escenario sísmico a través de GMMs, además de las condiciones de sitio, se consideran cuatro parámetros causales relevantes: la magnitud de momento (M_w), la distancia de la ruptura al sitio de interés (R), la profundidad hipocentral (Z_{hyp}) y el mecanismo de falla. Estos parámetros son determinados/inferidos de las correspondientes desagregaciones sísmicas. En general, se ha considerado para propósitos de este documento que profundidades hipocentrales (Z_{hyp}) menores a 60 km corresponden a sismos interplaca; y profundidades mayores, corresponden a sismos intraplaca.

5.2 ESPECTROS DE AMENAZA DETERMINISTICOS

A partir de lo anterior, se construyen 1248 desagregaciones de amenaza las cuales comprenden los siguientes escenarios de interés para Chile:

- 13 regiones de Chile.
- 3 zonas sísmicas.
- 4 tipos de suelo (A, B, C y D).
- 2 periodos de retorno (2475 y 475 años).
- 2 periodos espectrales (0.2 y 1.0 segundos).
- 2 modelos del movimiento de suelo (Idini *et al.*, 2016 y Montalva *et al.*, 2017).

A modo de referencia, la Tabla 2 muestra escenarios aproximados para las distintas zonas geográficas y sísmicas, para periodos espectrales cortos y largos; esta se obtuvo del promedio de los correspondientes resultados de los GMM de Idini *et al.*, 2016 y Montalva *et al.*, 2017 para un T_r de 475 años.

Tabla 2. Escenarios referenciales para un T_r de 475 años

| Periodo | Zona geográfica | Zona sísmica | R (Km) | Z_{hyp} (Km) | M_w |
|---------|-----------------|--------------|--------|----------------|-------|
| Corto | Norte Grande | 1 | 143 | 106 | 7,66 |
| | | 2 | 109 | 83 | 7,73 |
| | | 3 | 67 | 50 | 8,11 |
| | Norte Chico | 1 | 131 | 72 | 7,93 |
| | | 2 | 109 | 60 | 8,03 |
| | | 3 | 53 | 36 | 8,29 |
| | Centro | 1 | 119 | 70 | 8,08 |
| | | 2 | 85 | 52 | 8,17 |
| | | 3 | 64 | 40 | 8,30 |
| | Sur | 1 | 92 | 32 | 8,60 |
| | | 2 | 60 | 31 | 8,50 |
| | | 3 | 49 | 31 | 8,46 |
| Largo | Norte Grande | 1 | 174 | 58 | 8,51 |
| | | 2 | 118 | 51 | 8,49 |
| | | 3 | 69 | 39 | 8,55 |
| | Norte Chico | 1 | 149 | 41 | 8,70 |
| | | 2 | 117 | 38 | 8,68 |
| | | 3 | 58 | 32 | 8,66 |
| | Centro | 1 | 133 | 39 | 8,80 |
| | | 2 | 96 | 36 | 8,74 |
| | | 3 | 72 | 32 | 8,75 |
| | Sur | 1 | 102 | 29 | 8,83 |
| | | 2 | 67 | 29 | 8,80 |
| | | 3 | 56 | 28 | 8,79 |

5.3 ESPECTROS DE AMENAZA DETERMINÍSTICOS

Para generar los espectros de amenaza determinísticos de los sitios de interés, se evalúa para cada GMM los escenarios para 0.2 y 1.0 segundos considerando los valores medios más una desviación estándar. Luego, se define el espectro envolvente a partir de los espectros obtenidos de los escenarios anteriores. Posteriormente, se ponderan estos espectros por un coeficiente definido por los árboles lógicos y se suman para construir el espectro de amenaza determinístico para un sitio de interés. La Figura 7 muestra el diagrama de flujo para este proceso.

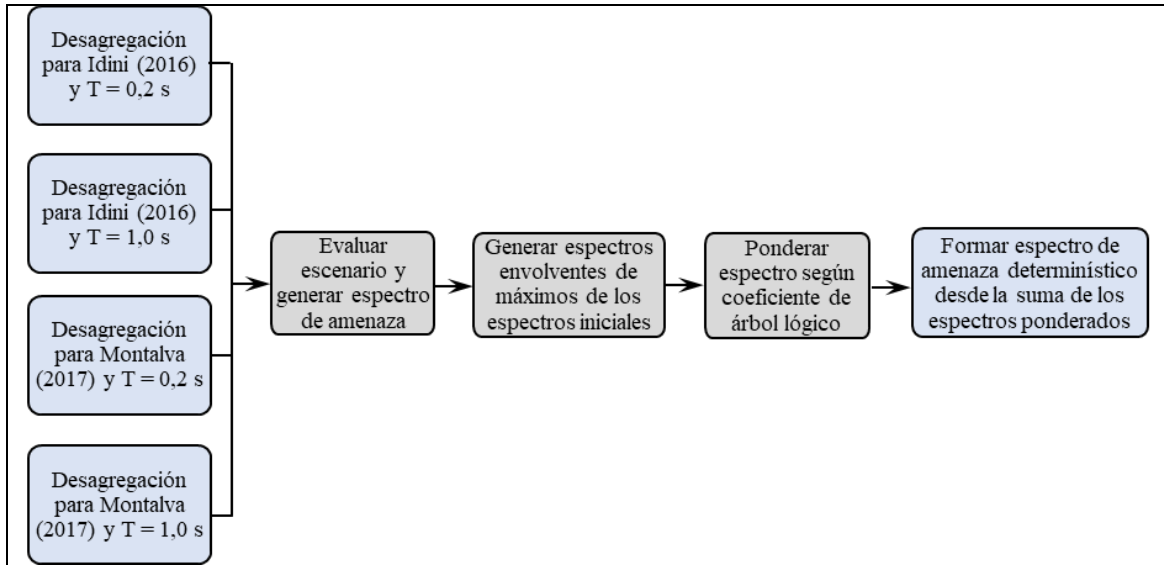


Figura 7. Diagrama de flujo para generar un Espectro de Amenaza Determinístico.

En base a lo anterior, se construyen 624 espectros de amenaza los cuales comprenden los siguientes escenarios de interés para Chile:

- 13 regiones de Chile.
- 3 zonas sísmicas.
- 4 tipos de suelo (A, B, C y D).
- 2 periodos de retorno (2475 y 475 años).
- 2 conjuntos de modelos de movimiento del suelo (Idini *et al.*, 2016, Montalva *et al.*, 2017).

5.4 ESPECTROS MEDIANOS DETERMINÍSTICOS

Siguiendo la misma metodología que para la evaluación probabilística de los espectros, se definen los espectros de amenaza mediano y mediano más/menos una desviación estándar (ver Figura 8). Estos se basan en los espectros determinísticos obtenidos previamente y consideran los resultados para períodos de retorno de 475 años, usando los árboles lógicos para Idini *et al.*, 2016 y Montalva *et al.*, 2017.

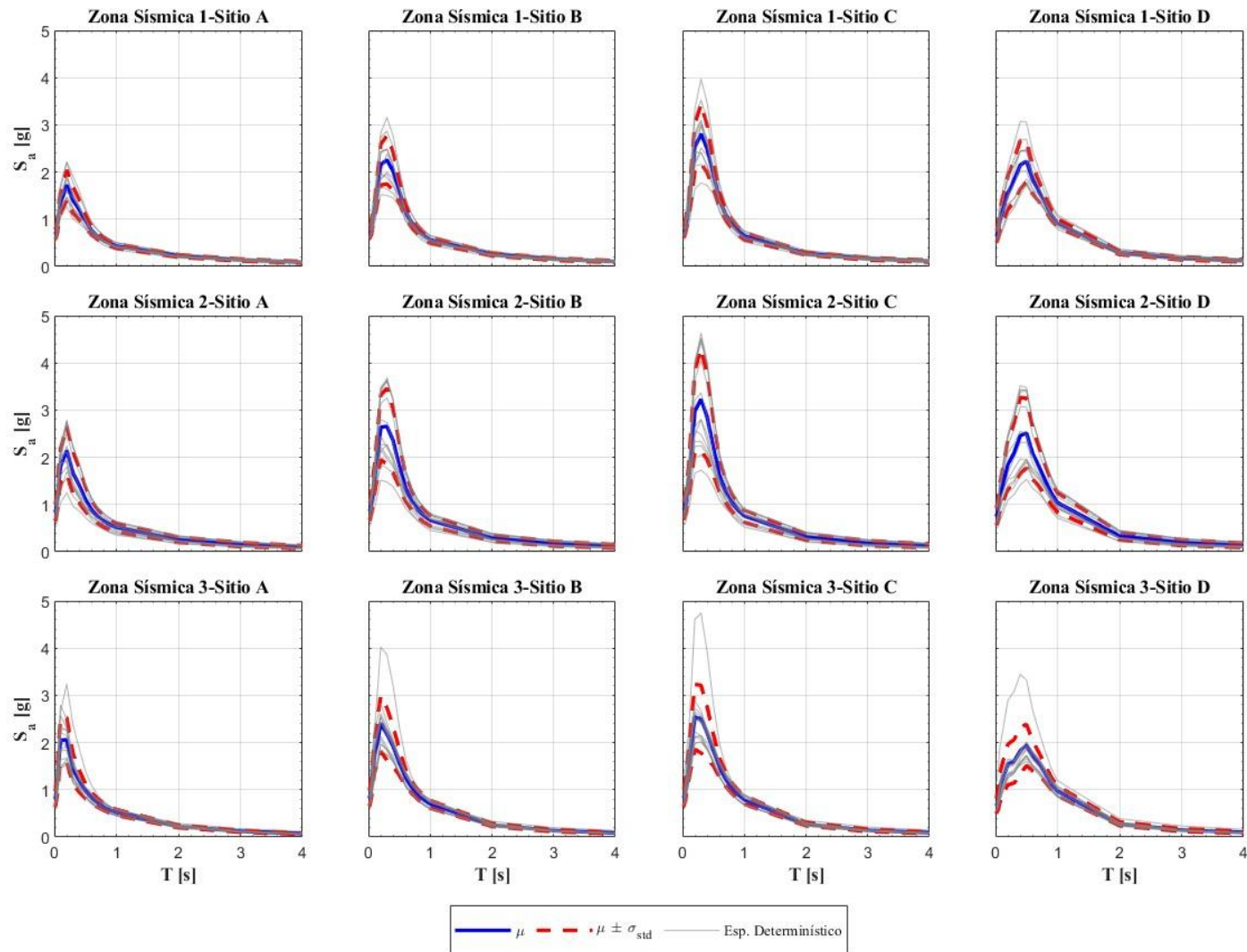


Figura 8. Espectros de Amenaza Determinísticos por zona sísmica y tipo de suelo, T_r de 475 años y GMM: Idini *et al.*, 2016; Montalva *et al.*, 2017.

6 ESPECTROS DE AMENAZA

6.1 ESPECTROS DE AMENAZA

Actualmente, no existe una preferencia o mayor aceptación entre los espectros de amenaza probabilísticos y determinísticos en la práctica nacional. En este documento se ha definido a los espectros de amenaza como los menores entre los espectros probabilísticos y los percentiles 84 de los escenarios determinísticos. Este criterio se basa principalmente en lo establecido en ASCE/SEI 7-16, aun cuando en dicho documento el criterio se refiere sólo a niveles de intensidad asociados específicamente a 2475 años de periodo de retorno medio.

6.2 ESPECTROS DE AMENAZA MEDIANOS

Una vez desarrollados todos los espectros de amenaza, según se indica en el punto anterior, la Figura 9 muestra los espectros de amenaza agrupados para cada zona sísmica. Además, se presentan los espectros medianos y medianos más/menos una desviación estándar.

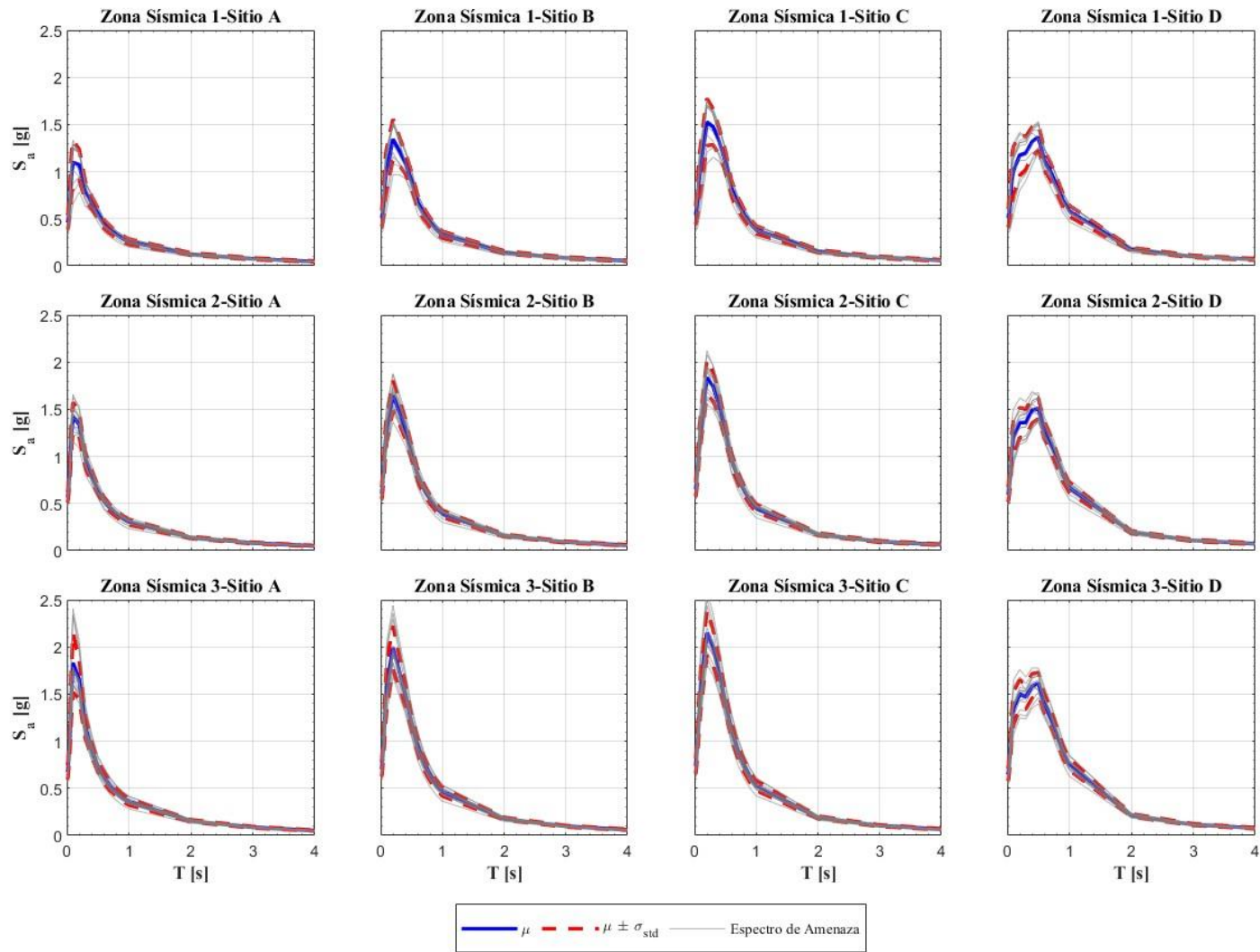


Figura 9. Espectros Medianos de Amenaza por zona sísmica y tipo de suelo, T_r de 475 años y GMM: Idini *et al.*, 2016; Montalva *et al.*, 2017.

7 COMPARACIÓN CON NORMAS NACIONALES

El propósito de este capítulo es comparar los espectros medianos de amenaza obtenidos en este estudio con los espectros de diseño elásticos de las normas sísmicas chilenas, estas son, NCh433.Of1996 modificada el 2009 más Decretos supremos posteriores, NCh2369.Of2003 (INN, 2003) y NCh2745:2013, referenciadas como NCh2369 (INN, 2003), NCh433 (INN, 2009) y NCh2745 (INN, 2013) de aquí en adelante, respectivamente. Es importante señalar que los espectros de diseño de las normas NCh2369.Of2003 (INN, 2003) y NCh433.Of1996 deben multiplicarse por el factor de combinación del método LRFD indicado en la norma NCh3171Of.2010 para realizar una comparación correcta de acuerdo con las definiciones de los espectros de amenaza y los métodos de diseño últimos o LRFD. Este factor en el caso de cargas sísmicas es igual a 1.4. No es necesario aplicar este factor al espectro de la norma NCh2745.Of2013, ya que su espectro ha sido construido bajo un enfoque probabilístico (al menos en la definición de sus PGAs).

La Figura 10 muestra los espectros medianos y medianos más/menos una desviación estándar de las relaciones que existen entre los espectros de amenaza resultantes para cada zona sísmica y tipo de suelo con los espectros de diseño de las normas nacionales.

En general, según la Figura 10, los espectros medianos de amenaza difieren del espectro de diseño propuesto por la norma NCh2369 (INN, 2003) en la mayoría de los casos. Sin embargo, estos presentan mayor similitud con el espectro de la norma NCh2745 (INN, 2013) y NCh433(INN, 2009). Se comentará más detalladamente sobre este tema a continuación:

7.1.1 Espectros de Diseño versus Espectros de Amenaza

- En periodos cortos, los espectros de diseño de las normas nacionales tienden a subestimar la demanda respecto de lo obtenido en los espectros de amenaza en suelos rígidos y de rigidez media (suelos tipo A, B y C), mientras que en suelos de blandos (suelos tipo D) presentan resultados similares o incluso mayores.
- En periodos medianos a largos, los espectros de amenaza muestran comportamientos diferentes en cada tipo de suelo:
 - En suelo tipo A, estos se asemejan al espectro de diseño de la norma NCh2745.
 - En suelo tipo B, a medida que se aleja de la zona cordillerana, los espectros de amenaza tienden a presentar intensidades menores que el espectro de diseño de la norma NCh2745 (INN, 2013) y se acercan o asemejan al espectro de la norma NCh433(INN, 2009).
 - En suelo tipo C, el comportamiento es similar al suelo B.
 - En el suelo D, vuelven a parecerse al espectro de diseño de la norma NCh2745, y a medida que se aleja de la zona cordillerana, los Espectros de Amenaza tienden a registrar intensidades menores que el espectro de diseño de la norma.

7.1.2 NCh2369.Of2003 y Propuesta de Modificación

Se puede observar que en periodos cortos el espectro de diseño propuesto por la norma NCh2369 (INN, 2003) se encuentra muy alejado de las intensidades espectrales obtenidas en este estudio. De acuerdo con lo anterior, en la sección siguiente se presenta una propuesta de actualización para el espectro de la normativa industrial NCh2369 (INN, 2003).

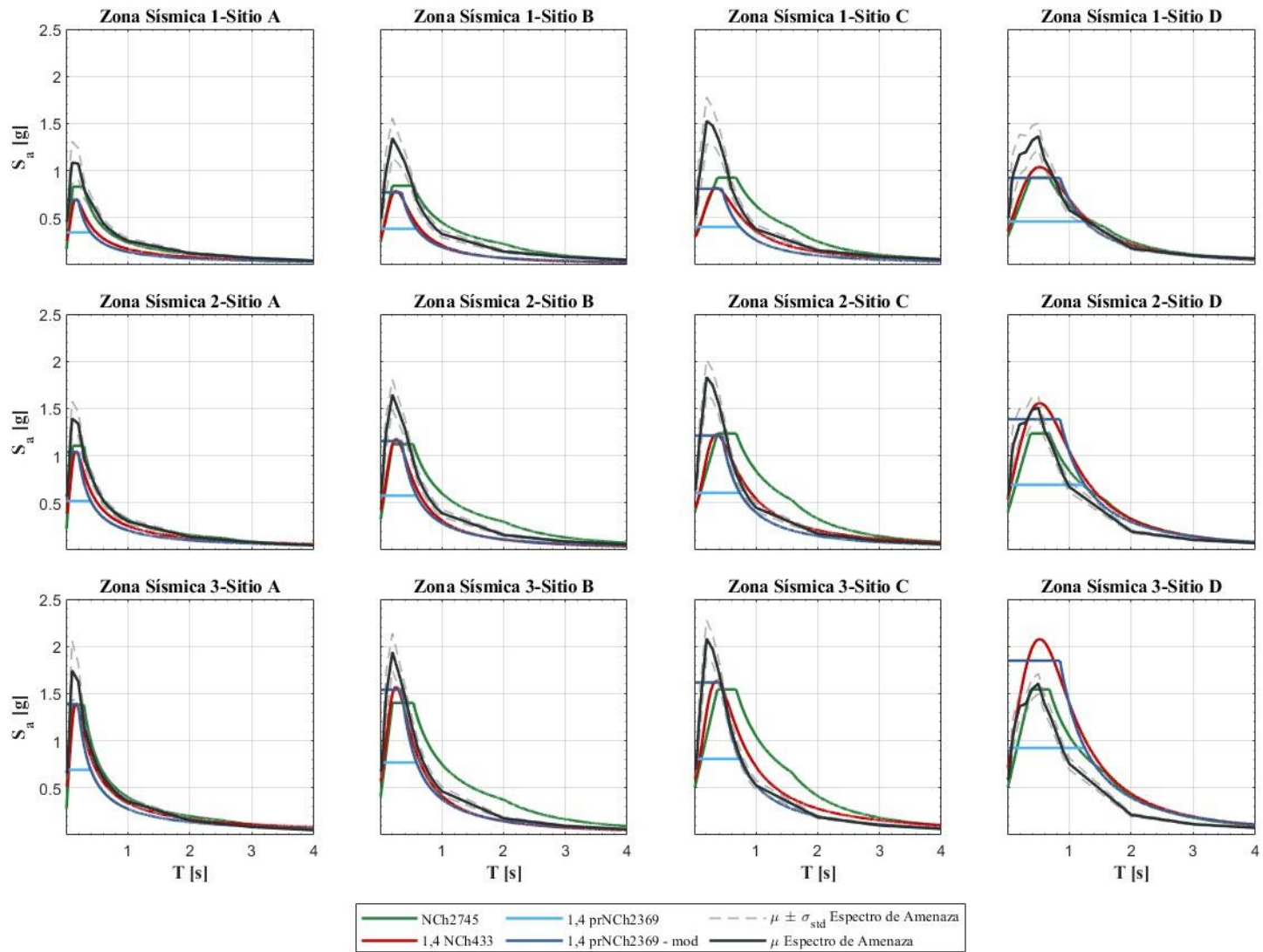


Figura 10. Comparación de espectros medianos de amenaza con los espectros de diseño de las normas sísmicas chilenas

8 ESPECTRO DE REFERENCIA Y DISEÑO PROPUESTOS PARA ACTUALIZACIÓN DE NORMA NCh2369 (vigente INN 2023).

En base a los antecedentes anteriores, y entendiendo que corresponde a una definición general aproximada, se propone para la actualización de la norma NCh2369 al espectro de NCh433+DS61 amplificado por un 40% como el espectro de referencia para la actualización de la norma NCh2369 (vigente INN 2023). Se estima que dicho nivel de intensidad representa razonablemente bien una intensidad promedio con una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años (i.e., PRM=475 años).

A diferencia de la definición espectral definida en la norma sísmica NCh2369.Of2003, este espectro de referencia se estima adecuado para los siguientes propósitos:

- Base para la definición del espectro de diseño horizontal.
- Base para la definición del espectro de diseño vertical.
- Estimación de deformaciones elásticas.
- Espectro objetivo para la selección de registros sísmicos.

Finalmente, el espectro de referencia se define como:

$$S_{aH}(T_H) = 1.4SA_0 \left(\frac{1 + 4.5 \left(\frac{T_H}{T_0} \right)^p}{1 + \left(\frac{T_H}{T_0} \right)^3} \right) \quad (6)$$

Donde,

A_0 : Aceleración efectiva máxima (del suelo) definida en normativa según la zonificación sísmica.

S, T_0, p : Parámetros relativos al tipo de suelo de fundación.

T_H : Período de vibración del modo horizontal considerado.

La Figura 11 muestra los espectros de referencia para cada tipo de suelo, normalizados a la aceleración efectiva máxima del suelo A_0 .

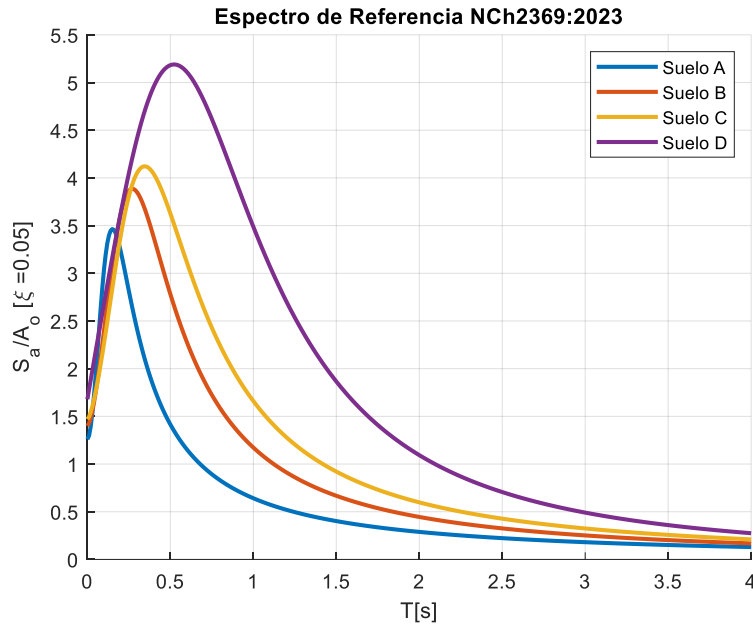


Figura 11. Espectro de Referencia propuesto para actualización de NCh2369

Luego, con el propósito de mantener la tradición y el estado de la práctica, tanto industrial como habitacional, el espectro propuesto define al espectro de diseño horizontal como un espectro de “servicio” o espectro “ASD” (i.e., consistentes con una formulación de diseño por resistencias admisibles). Sin embargo, dada la definición más trazable y conforme al estado del arte, los espectros de diseño provienen del espectro de referencia antes indicado.

De acuerdo con lo anterior, el espectro de referencia propuesto es modificado por un factor igual a 0.7 (para llevarlo a nivel ASD), además de incorporar parámetros de diseño, como son el factor de modificación de respuesta R y la razón de amortiguamiento ξ .

Luego, el espectro de diseño elástico horizontal propuesto se define como:

$$S_a(T_H) = 0.7 \frac{I S_{aH}(T_H)}{R} \left(\frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4} \quad (7)$$

La Figura 12 muestra el espectro elástico de diseño horizontal para los distintos tipos de suelo, normalizados a la aceleración efectiva máxima del suelo A_0 .

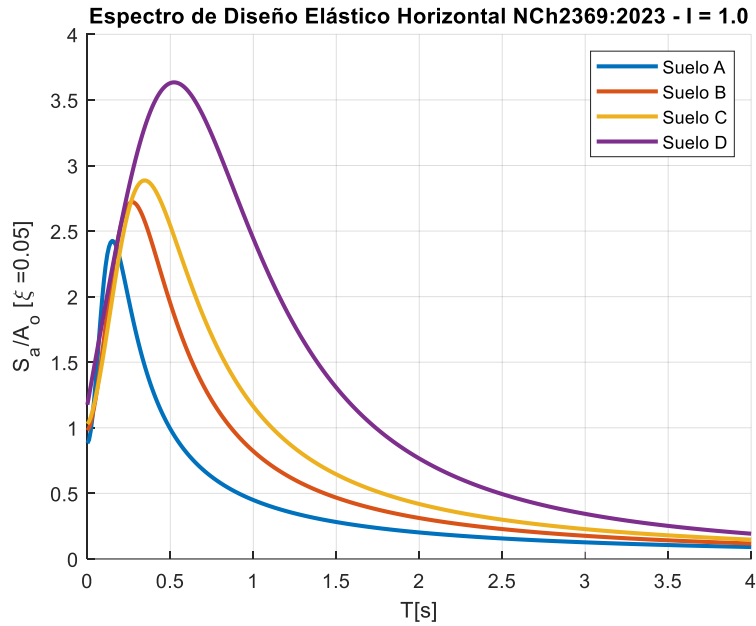


Figura 12. Espectro de Diseño Elástico propuesto para actualización de NCh2369

9 ESPECTRO Y RELACIÓN DE DEMANDAS HORIZONTALES PROPUESTAS VERSUS NCh2369.Of2003

Ya definidas las demandas de diseño, la Figura 13 presenta los espectros de diseño horizontal para factores de modificación de respuesta $R=1, 3$ y 5 (factores más usados en la práctica de diseño estructural industrial). En todos los casos se ha considerado una razón de amortiguamiento $\xi = 0.05$.

Luego, la Figura 14 presenta la relación, para los distintos tipos de suelos, entre las demandas de diseño horizontal definidas por NCh2369:2023 y NCh2369.Of2003 para factores de modificación de respuesta $R=1, 3$ y 5 .

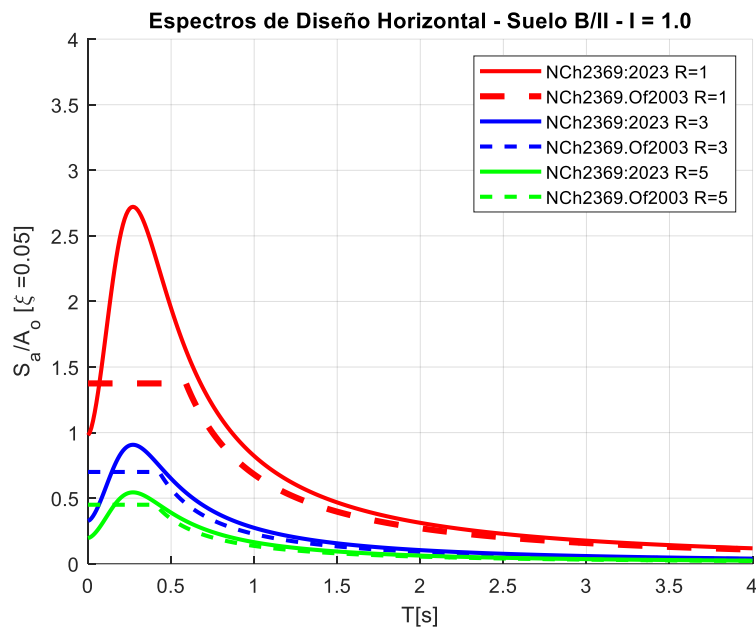
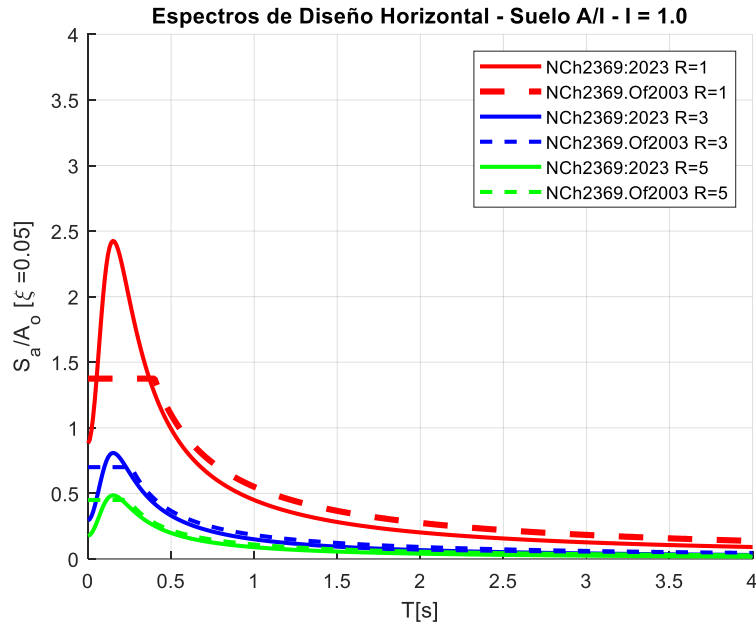


Figura 13. Espectro de Diseño Horizontales propuestos y NCh2369.Of2003 (continúa)

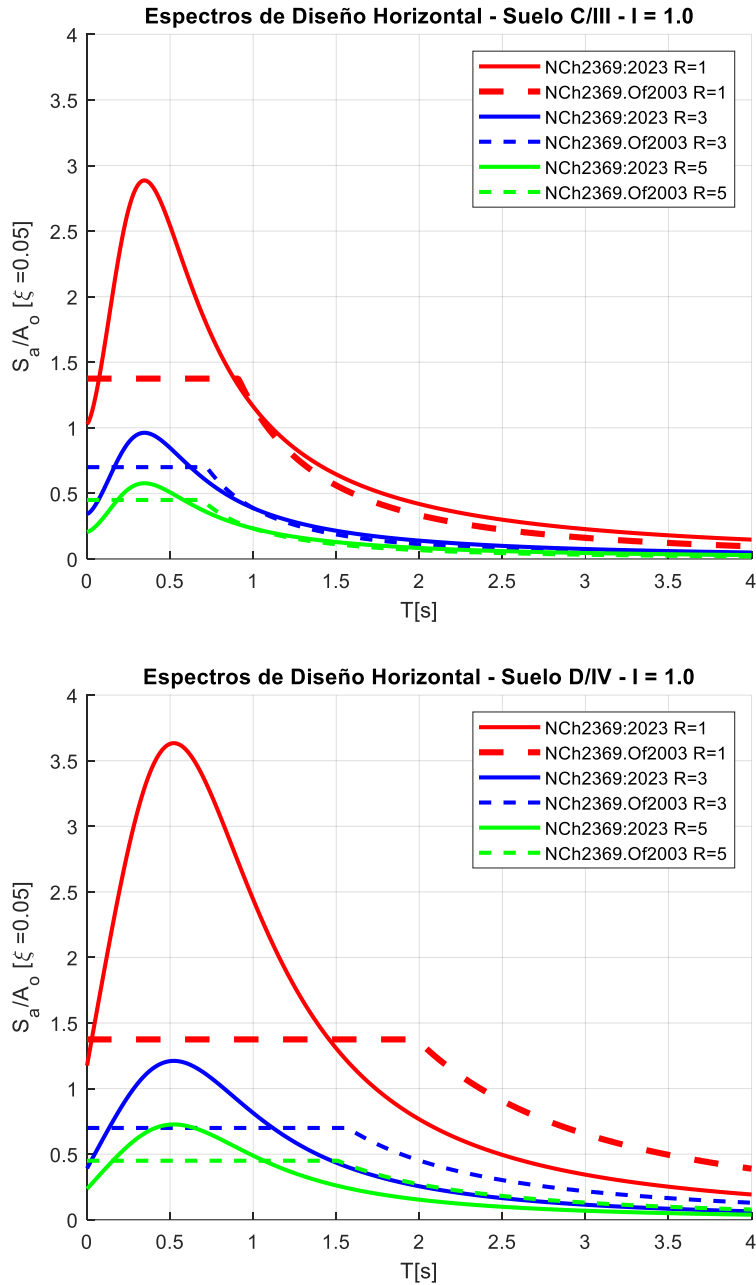


Figura 13. Espectro de Diseño Horizontales propuestos y NCh2369.Of2003

Es posible observar que en zonas de periodos cortos (menores a 0.20 seg. aproximadamente) la norma NCh2369:2023 presenta niveles de demanda menores a los definidos por su predecesor NCh2369.Of2003. Para evitar esta situación se han propuesto coeficientes sísmicos mínimos de periodo corto, lo que tiene por objetivo establecer niveles de corte basal similares a los mínimos considerados históricamente.

En presencia de rocas o suelos muy firmes (i.e., A/I y B/II) es posible observar que los niveles de demanda espectral de NCh2369:2023 son prácticamente equivalentes a los de definidos en NCh2369.Of2003, salvo en demandas elásticas ($R=1$) para el diseño de estructuras rígidas (T_H menores a 0.4 ~ 0.5 segundos y mayores a 0.1 segundo aproximadamente) en donde se puede observar razones máximas entre 1.8 a 2.0 veces la demanda de NCh2369.Of2003.

En presencia de suelos densos (i.e., C/III) es posible observar que los niveles de demanda espectral de NCh2369:2023 son en promedio 30% más altos aproximadamente para factores de modificación de respuesta típicos (i.e., $R=3$ y $R=5$). Estos valores aumentan, en estructuras rígidas, en la medida que se desea desarrollar una respuesta elástica para los niveles demanda de diseño.

En presencia de suelos medianamente densos (i.e., D/IV) es posible observar que los niveles de demanda espectral de NCh2369:2023 son mayores aproximadamente en un 30% en estructuras con periodos de vibración entre 0.25 y 1.0 segundo. Para estructuras más flexibles las demandas espectrales son menores en el contexto de la norma NCh2369:2023. Estas conclusiones son válidas para sistemas que consideren factores de modificación de respuesta típicos (i.e., $R=3$ y $R=5$). Estos valores aumentan considerablemente en presencia de sistemas que se diseñan para responder de manera elástica frente a los niveles de intensidad de diseño.

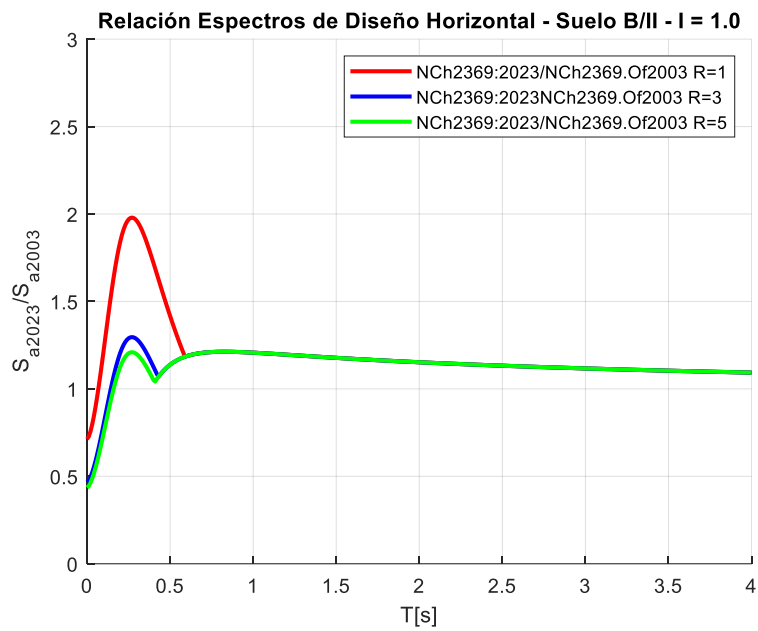
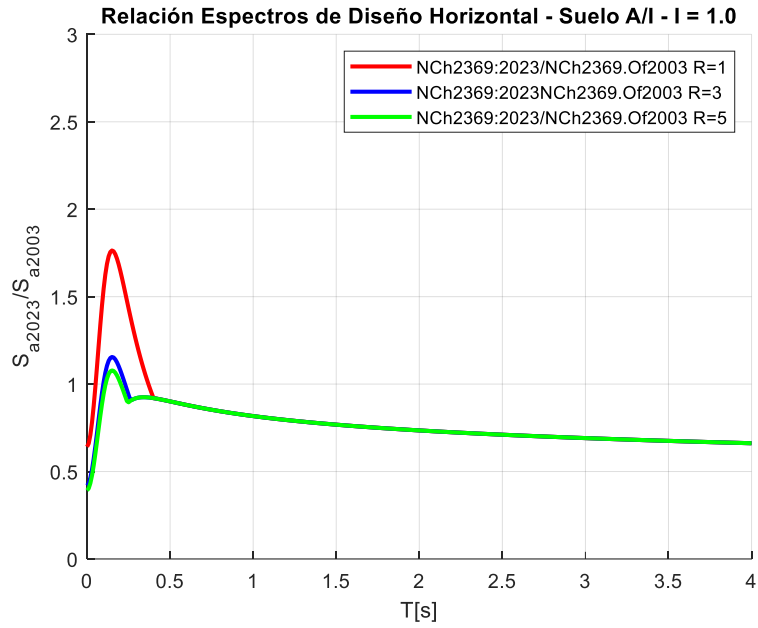


Figura 14. Relación demandas espectrales Espectro Propuesto y NCh2369.Of2003
(continúa)

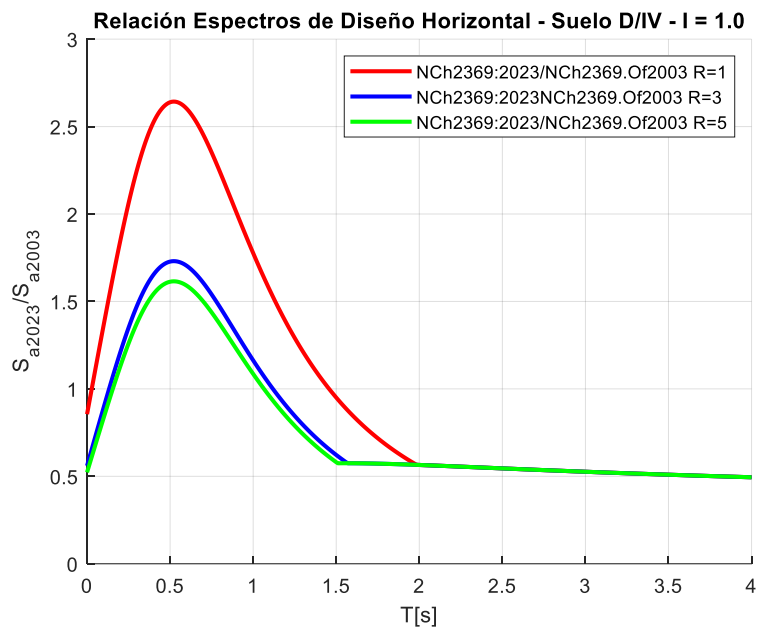
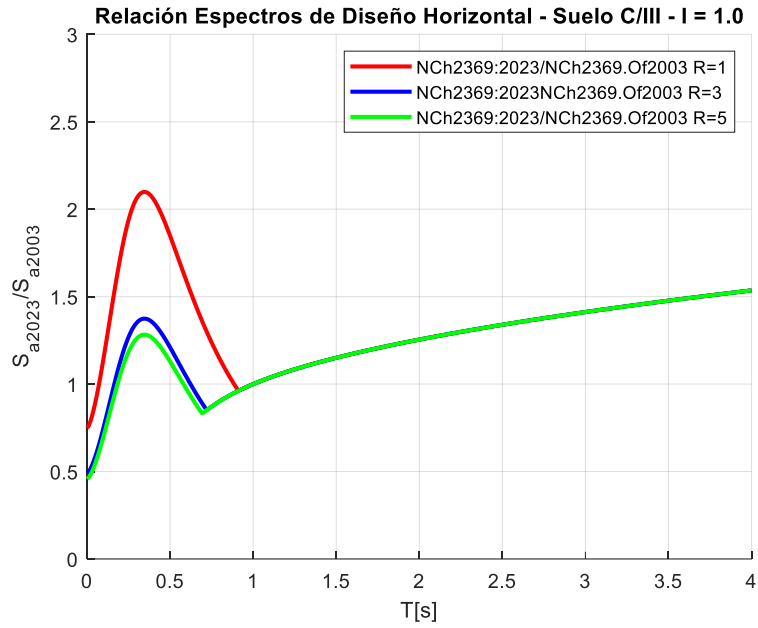


Figura 1415. Espectro de Diseño Horizontales propuestos y NCh2369.Of2003

10 COMENTARIOS

Como resultado del estudio de la evaluación de la amenaza sísmica se logra observar:

- La demanda elástica de diseño definida en la normativa NCh2369.Of2003 presenta deficiencias para representar la amenaza sísmica nacional (subestimación importante). Esta diferencia se concentra particularmente en la zona de periodos cortos dado los coeficientes máximos definidos en dicha normativa.
- La distribución espacial de la amenaza sísmica uniforme difiere ostensiblemente de la zonificación propuesta en la normativa NCh2369 (tanto en su versión 2003 como la versión vigente INN 2023).
- La sismicidad intraplaca genera una amenaza sísmica muy superior, en zona de periodos cortos, a la definida en la normativa nacional (particularmente en la franja central de la zona norte del país).
- Las demandas elásticas de NCh433-DS61 amplificadas en un 40% representan razonablemente, a nivel medio, demandas espectrales elásticas consistentes con niveles de intensidad con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años.

Respecto de los espectros de diseño de propuestos para NCh2369:

- Representan de mejor manera los niveles medios de amenaza sísmica estimados para niveles de intensidad con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años en el territorio nacional.
- Su formulación establece requisitos consistentes entre las demandas sísmicas horizontales y verticales, las demandas de desplazamiento y espectros objetivos para la selección de registros sísmicos.
- Los niveles de demanda sísmica elástica ($R=1$), en estructuras semi-rígidas, son muy superiores a los definidos en la norma NCh2369.Of2003. Sin embargo, los niveles de demanda para propósitos de diseño estándar (i.e., $R=3$ y $R=5$) son comparables, con aumentos razonables de acuerdo con la sismicidad registrada en los últimos grandes terremotos registrados en Chile.
- Si bien, se estima que las nuevas demandas son razonablemente adecuadas para representar niveles de intensidad con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años desde una perspectiva general y estándar, se debe entender que estas definiciones se definen como mínimos razonables, y que en proyectos relevantes, o en sitios que presentan singularidades, es recomendable realizar estudios de amenaza sísmica que consideren de manera específica características locales del sitio (p.ej., sismicidad intraplaca y cortical, formas espectrales en presencia de suelos muy blandos, efectos topográficos, etc.).

11 REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers, 2017. *Minimum Design Loads and Associated criteria for buildings and other structures : ASCE/SEI 7 - 16*. Primera ed. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Baker, J. W. & Cornell, C. A., 2006. Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(9), pp. 1077-1095.
- Barrientos, S., 1980. *Regionalización sísmica de Chile*, Santiago: Tesis para optar el grado de Magíster en Ciencias, mención Geofísica - Universidad de Chile.
- Bazzurro, P. & Cornell, C. A., 1999. Disaggregation of Seismic Hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(2), pp. 501-520.
- Belmonte-Pool, J., 1997. *Análisis del contacto sismogénico interplaca a lo largo de Chile. Tesis de Magíster en Ciencias (Inédito)*. Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Geofísica.
- Boomer, J. J., 2006. *Rethinking seismic hazard mapping and design return periods*. Genova, Proceedings.
- Boomer, J. J. & Pinho, R., 2006. Adapting earthquake actions in Eurocode 8 for performance-based seismic design. *Earthquake Eng. Struct. Dyn*, Volumen 35, pp. 39-55.
- Boomer, J. & Scherbaum, F., 2008. The Use and Misuse of Logic Trees in Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *Earthquake Spectra*, 24(4), pp. 997-1009.
- Boore, D. M., 2010. Orientation-Independent, Nongeometric-Mean Measures of Seismic Intensity from Two Horizontal Components of Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), pp. 1830-1835.
- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J. & Abrahamson, N. A., 2006. Orientation-independent measures of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(1), pp. 1502-1511.
- Boroschek, R. & Contreras, V., 2012. *STRONG GROUND MOTION FROM THE 2010 Mw 8.8 MAULE CHILE EARTHQUAKE AND ATTENUATION RELATIONS FOR CHILEAN SUBDUCTION ZONE INTERFACE EARTHQUAKES*. Tokyo, Proced.
- Candia, G., 2019. Assessment, A New State-of-the-Art Platform for Probabilistic and Deterministic Seismic Hazard. *Seismological Research Letters*, 90(6), pp. 2262-2275.

- Gutenberg, B. & Richter, C., 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 188(34), p. 185.
- Idini, B., 2016. Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Volumen 15, pp. 1853-1880.
- Instituto Nacional de Normalización, 2003. *Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales : NCh 2369 Of. 2003*. Primera ed. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.
- Instituto Nacional de Normalización, 2009. *Diseño sísmico de edificios : NCh 433 Of. 1996 Modificada en 2009*. Segunda ed. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.
- Instituto Nacional de Normalización, 2013. *Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica : NCh 2745 Of. 2013*. Segunda ed. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.
- Kramer, S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Primera ed. Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Leyton, F., Ruiz, J., Campos, J. & Kausel, E., 2009. Intraplate and interplate earthquakes in Chilean subduction zone: A theoretical and observational comparison. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175(1), pp. 37-46.
- Leyton, F., Ruiz, S. & Sepúlveda, S., 2010. Re-evaluation of probabilistic seismic hazard in central Chile. *Formerly Revista Geológica de Chile*, 37(2), pp. 455-472.
- Martín, A., 1990. Hacia una nueva regionalización y cálculo del peligro sísmico en Chile. *Master's Thesis*, Volumen University of Chile, Santiago, Chile (in Spanish).
- McGuire, R. K., 1995. Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing Loop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(5), pp. 1275-1284.
- Montalva, G., 2017. Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), pp. 901-911.
- Newmark, N. M. & Hall, W. J., 1982. *EARTHQUAKE SPECTRA AND DESIGN*. Primera ed. Oakland(California): The Earthquake Engineering Research Institute.
- Núñez, I., 2014. *Nuevo peligro sísmico para Chile*, Santiago: Master's Thesis, Universidad de Chile.
- Poulos, A., 2019. An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statical Validation of Its Poisson Nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1(109), pp. 66-74.

- Reyes, J. & Cárdenas, V. H., 2010. A Chilean seismic regionlization through a Kohonen neural network. *Neural Comput. Appl.*, 19(7), pp. 1081-1087.
- Suárez, G. & Comte, D., 1993. Comment on "Seismic coupling along the Chilean subduction zone" by B.W. Tichelaar & L. R. Ruff. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 98, pp. 15825-15828.
- Tichelaar, B. W. & Ruff, L. J., 1993. Depth of seismic coupling along the subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 98, pp. 2017-2037.
- van Schie, E. C. M. & van der Pligt, J., 1994. Getting an anchor on availability in causal judgment. *Org. Behav. Decis. Process*, Volumen 57, pp. 140-154.

12 ANEXO 1: DELIMITACIÓN DE ZONAS SÍSMICAS Y UBICACIÓN DE CIUDADES PRINCIPALES DENTRO DE CADA REGIÓN

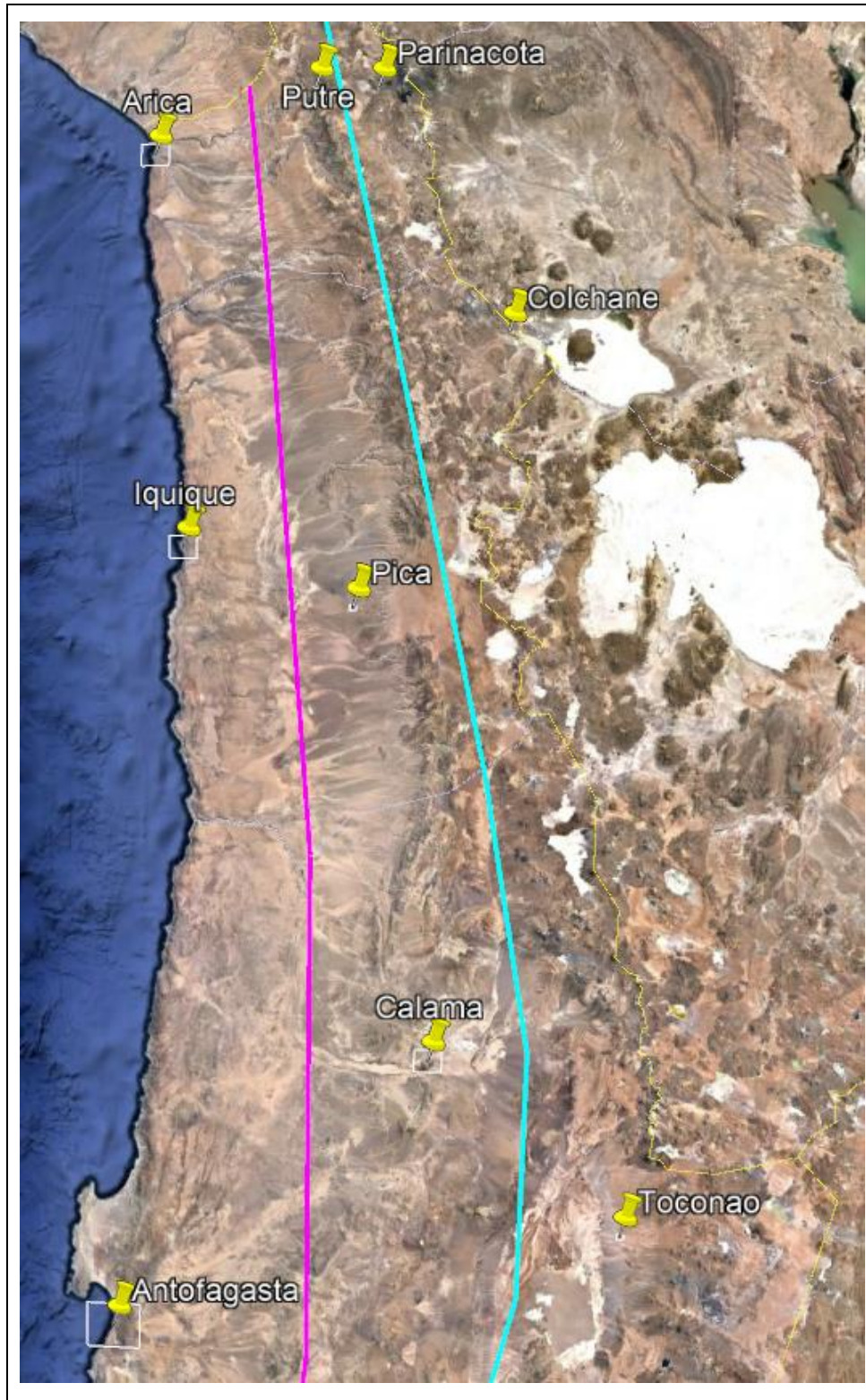


Figura A1.1: Zonas de interés para las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta (Google Earth, 2021).

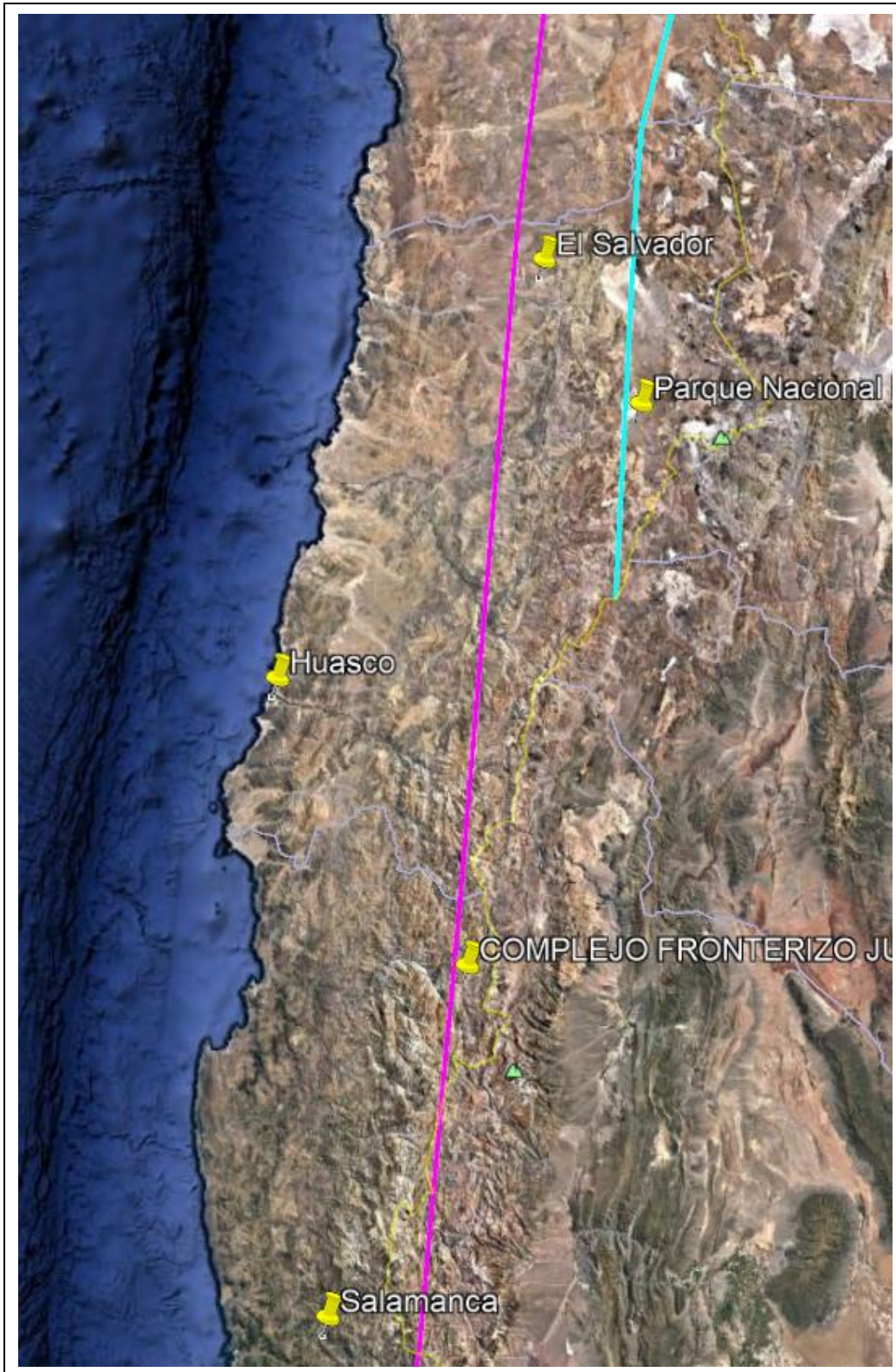


Figura A1.2: Zonas de interés para las regiones Atacama y Coquimbo (Google Earth, 2021).

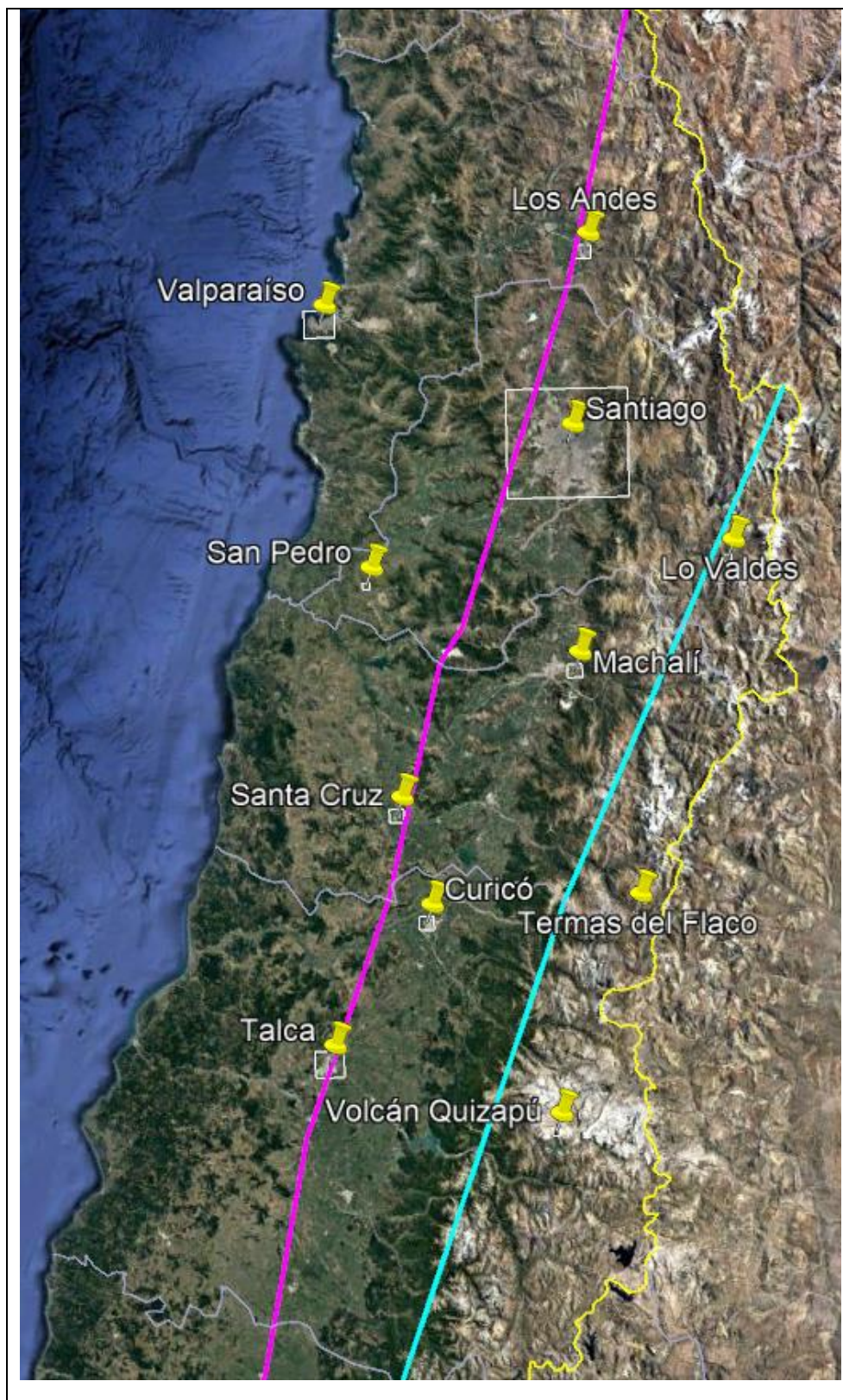


Figura A1.3: Zonas de interés para las regiones Valparaíso, Región Metropolitana, O'Higgins y Maule (Google Earth, 2021).

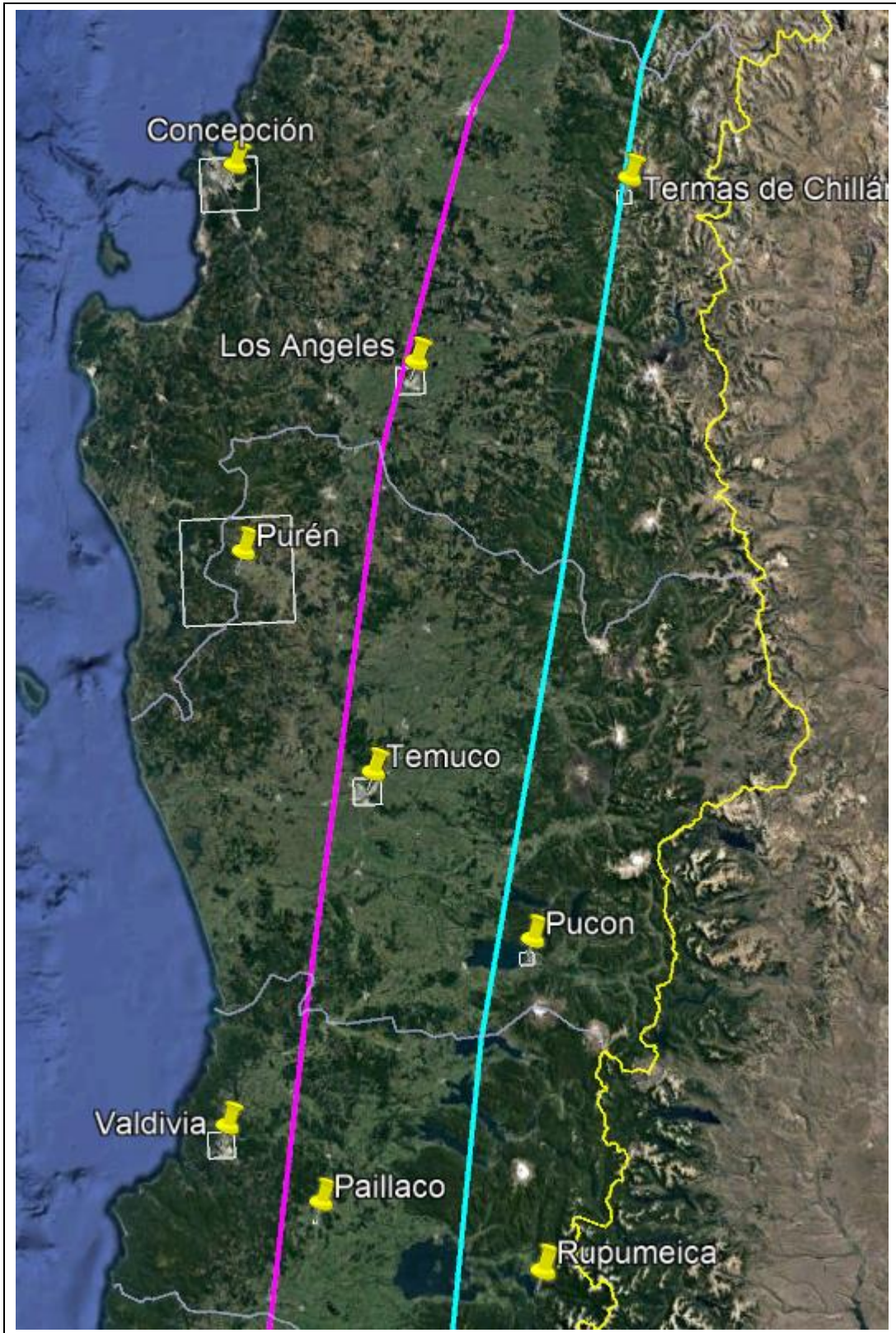


Figura A1.4: Zonas de interés para las regiones Biobío, Araucanía y Los Ríos (Google Earth, 2021).

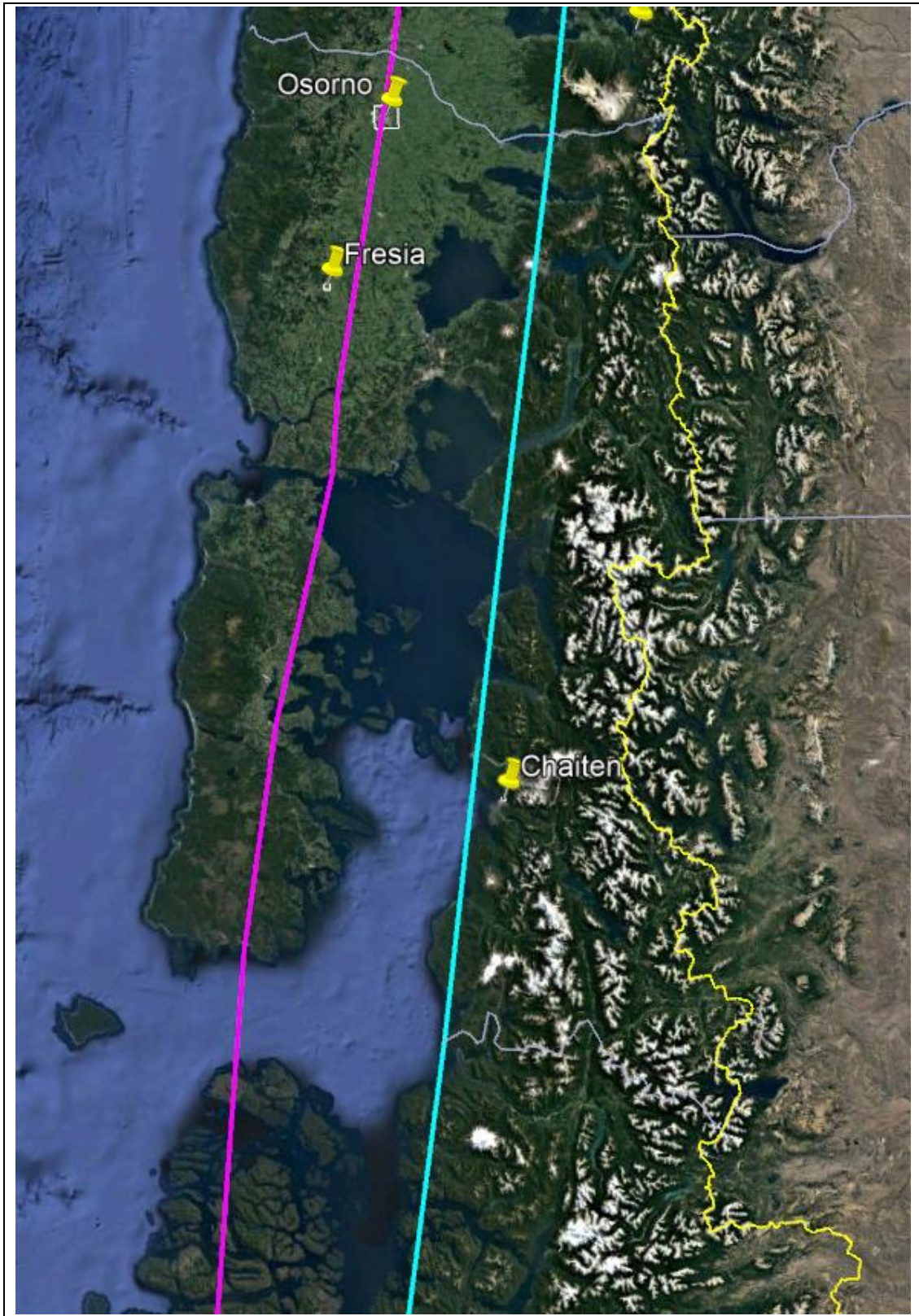


Figura A1.6: Zonas de interés para la región de Los Lagos (Google Earth, 2021).

13 ANEXO 2: ANÁLISIS DE LA DIRECCIONALIDAD DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA DE DISEÑO CHILENO

13.1 DEFINICIONES DE ORIENTACIONES DE MOVIMIENTOS DE SUELO

13.1.1 Componentes horizontales y componente vertical

Los movimientos de suelo por sismos son registrados por acelerógrafos triaxiales con dos componentes en la horizontal y una componente vertical. Los azimuts de las componentes horizontales son arbitrarios, pero es recurrente que sea el NS (norte positivo) para un componente y OE (este positivo) para el otro.

13.1.2 Media geométrica (Geomean)

Por definición, el espectro de respuesta de aceleración es computado para una dirección del movimiento de suelo. Ordenadas espectrales calculadas para las dos componentes horizontales (aquí S_{a-x} y S_{a-y}) se combinan según lo mostrado en la Ecuación (8) para conseguir la media geométrica (S_{a-gm}), de acuerdo con lo sugerido por Baker & Cornell (2006).

$$S_{a-GM} = \sqrt{(S_{a-x}) \times (S_{a-y})} \quad (8)$$

13.1.3 Componentes independientes (GMRotDnn)

El GMRotDnn es una metodología introducida por Boore *et al.* (2006) para evaluación de las componentes horizontales de movimientos de suelo que usa el ángulo de rotación dependiente del período. En esta, “D” señala el ángulo de rotación dependiente del período y “nn” es el fráctil de las medias geométricas para todos los ángulos de rotación ordenados por amplitud. (p.ej., GMRotD50 es el valor mediano y GMRotD100 es la envolvente sobre todos los ángulos de rotación).

13.1.4 Componente SRSS

Esta forma de evaluación ocupa el método de la raíz cuadrada de la suma de cuadrados, que se aplica a las componentes horizontales y que se puede expresar de la siguiente manera:

$$S_{a-SRSS} = \sqrt{(S_{a-x})^2 + (S_{a-y})^2} \quad (9)$$

Cabe destacar que, como exige el método SRSS, las componentes horizontales deben considerarse de forma independiente una de la otra.

13.2 ESTUDIO DE LA BASE DE DATOS DE SIBER-RISK

Se analiza la base de datos de Siber-Risk (Castro *et al.*, 2022) con el propósito de ver de forma más clara las relaciones que tienen las distintas orientaciones de los espectros de respuesta de sismos chilenos procesados en la base de datos.

Se analizaron más de 7677 espectros de respuesta que fueron agrupados por rangos de magnitudes ($M < 4.0$; $4.0 \leq M < 5.0$; $5.0 \leq M < 6.0$; $6.0 \leq M < 7.0$; $7.0 \leq M < 8.0$; $8.0 \leq M$). La tabla A2.1 resume la distribución de terremotos para las distintas clasificaciones ocupadas.

Tabla A2.1. Cantidad de terremotos según su M_w

| M_w | $4 < M_w \leq 5$ | $5 < M_w \leq 6$ | $6 < M_w \leq 7$ | $7 < M_w \leq 8$ | $M_w > 8$ |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|
| Cantidad de Terremotos | 3008 | 3008 | 1422 | 147 | 92 |

La Tabla A2.2 presenta valores aproximados para las relaciones entre distintas componentes direccionales dependientes e independientes. Es importante tener en cuenta que estos valores son solo de referencia y no deben tomarse como exactos. En el caso de requerir estos para el ejercicio profesional o académico, considerar las figuras que se muestran más abajo. Al observar la tabla, se puede ver que algunas relaciones tienen una proporcionalidad directa clara, como las que involucran a GMRotD y las relaciones GeoMean/GMRotD50 y SRSS/GMRotD50. Sin embargo, hay casos en los que hay mucha variabilidad en los resultados, especialmente en las relaciones que incluyen direcciones NS, OE y Vertical. En estos casos, las relaciones son discutibles y requieren de más investigación. Además, se observa que la orientación que produce valores máximos es GMRotD100. Por otro lado, se observa que en periodos cortos (0.2 s) la relación que se obtiene con GMRotD50 es cercana a 1.2 y en periodos más largos es cercana a 1.25. Al considerar que esta dirección es similar a la media geométrica, los valores de ajuste son similares a los propuestos por ASCE 7-16.

Tabla A2.2. Relaciones referenciales para los componentes direccionales

| Dirección | Periodo | | | | | |
|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|-----------|
| | Corto | | | Largo | | |
| | GMRotD0 | GMRotD50 | GMRotD100 | GMRotD0 | GMRotD50 | GMRotD100 |
| NS | 0,8 | 1,05 | 1,25 | 0,65 | 1 | 1,2 |
| OE | 0,8 | 1 | 1,2 | 0,725 | 1,15 | 1,45 |
| Vertical | 1,5 | 2 | 2 | 1,25 | 1,5 | 2,5 |
| SRSS | n.a | 0,7 | n.a | n.a | 0,7 | n.a |
| GeoMean | n.a | 1,05 | n.a | n.a | 1 | n.a |
| GMRotD0 | 1 | 1,25 | 1,5 | 1 | 1,6 | 2 |
| GMRotD50 | 0,8 | 1 | 1,2 | 0,625 | 1 | 1,25 |
| GMRotD100 | 0,666 | 0,833 | 1 | 0,5 | 0,8 | 1 |

En las Figuras A2.1 a A.2.3 se muestran las relaciones asociadas a M_w para las direcciones RotD50, Geomean, SRSS y RotD100.

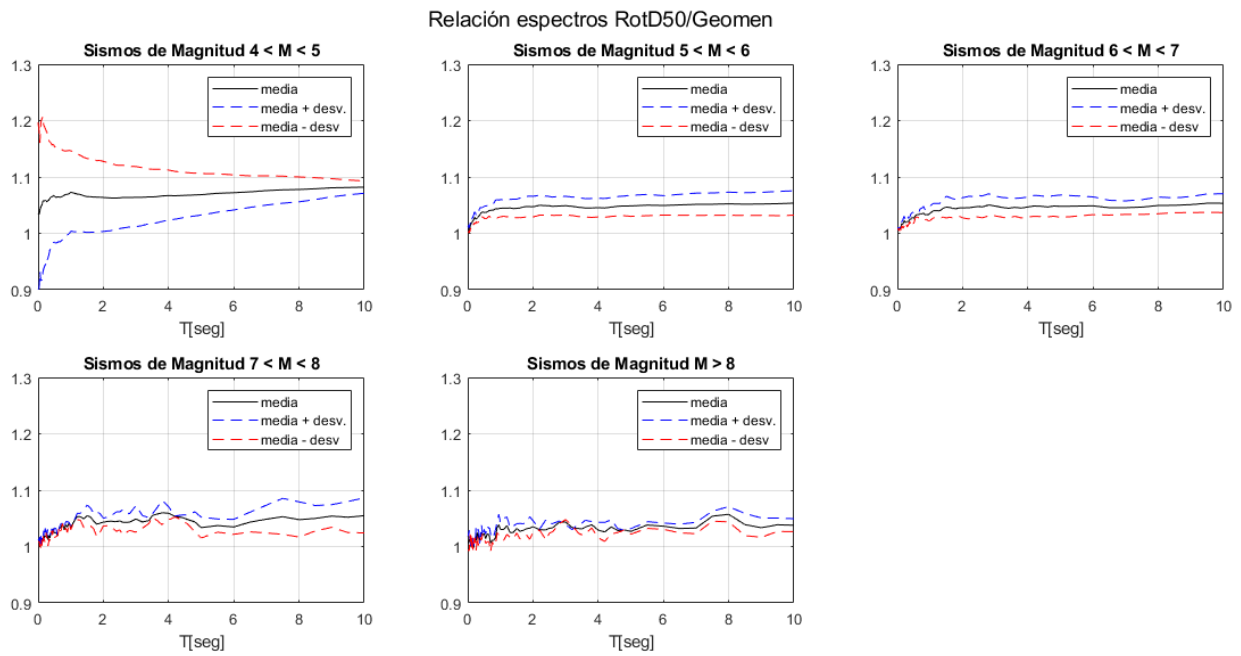


Figura A2.1: Relación entre Espectros RotD50/Geomean según su M_w .

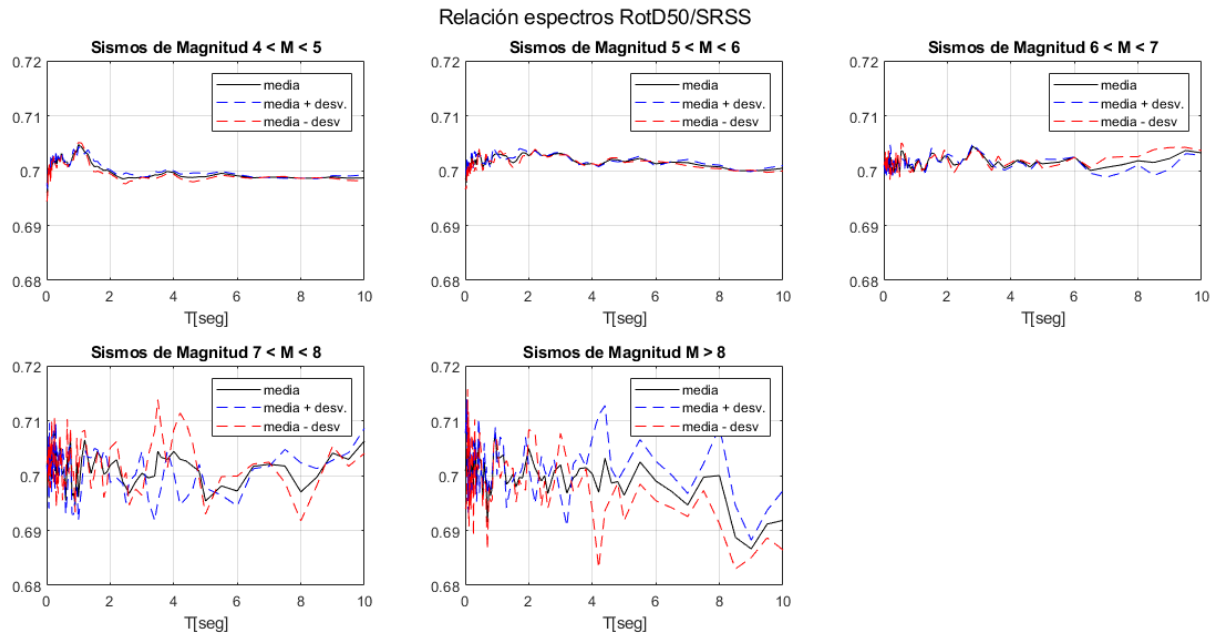


Figura A2.2: Relación entre Espectros RotD50/SRSS según su M_w .

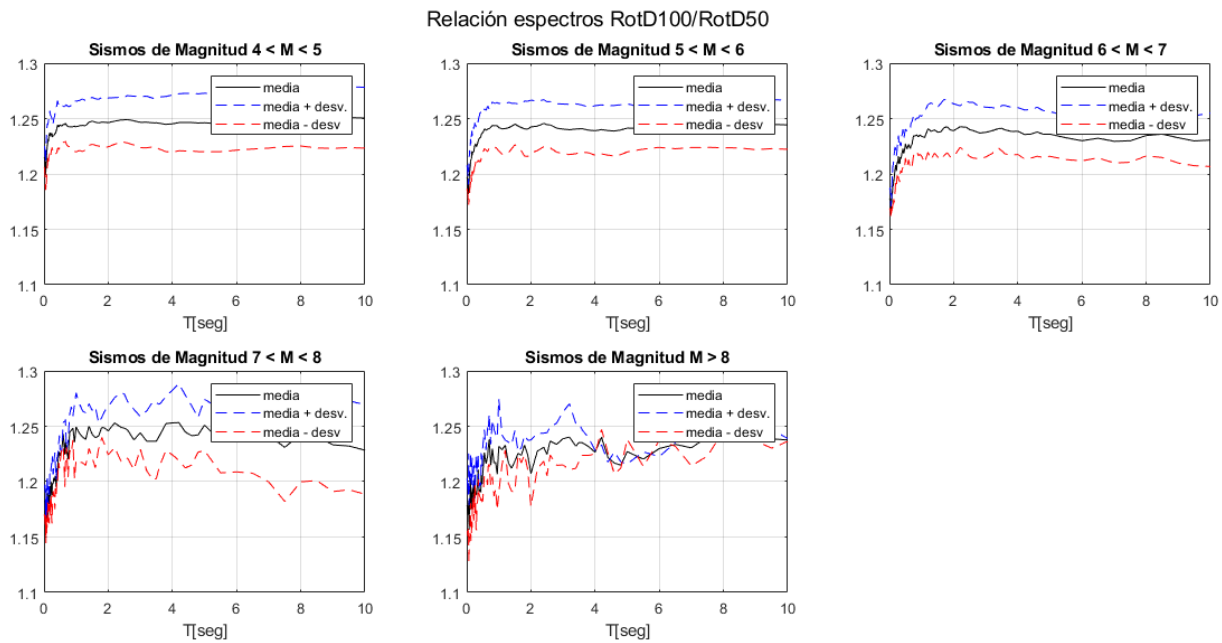


Figura A2.3: Relación entre Espectros RotD100/RotD50 según su M_w .