



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

# **Estimación del período de retorno del espectro de diseño sísmico de la norma NCh433**

Memoria de Título presentada por

**Constanza Andrea Toro Silva**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Pablo Heresi Venegas

Marzo de 2022



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**Estimación del período de retorno del espectro de diseño sísmico de la norma NCh433**

AUTOR:

**Constanza Andrea Toro Silva**

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Pablo Heresi Venegas

.....

Santiago, Chile, marzo de 2022

# ESTIMACIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO DEL ESPECTRO DE DISEÑO SÍSMICO DE LA NORMA NCh433

Constanza Toro Silva<sup>1</sup>, Pablo Heresi Venegas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Técnica Federico Santa María

## Resumen

En la norma actual para el diseño sísmico de edificios no se especifica de manera explícita el período de retorno asociado a los espectros de diseño. Sin embargo, varios documentos que dieron paso a la creación de las normas, e incluso algunas normas como tal, dan a entender que el criterio que prevalece en los cálculos corresponde al de un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años, lo cual se traduce en un período de retorno de 475 años.

Debido a esto, el presente estudio tiene por objetivo estimar el período de retorno de los espectros de diseño de la norma NCh433 con el propósito de otorgarle una base científica respecto a la ocurrencia de los eventos de diseño.

Para esto se realiza un análisis comparativo de los espectros de diseño con espectros de amenaza uniforme (UHS) para distintos períodos de retorno, los cuales son obtenidos a partir de un análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA) utilizando el software OpenQuake. Los UHS son calculados para períodos de retorno desde 10 hasta 10000 años para cada uno de los sitios de análisis, los cuales se distribuyen uniformemente espaciados cada 50[km] para un caso general que abarca desde la Región de Arica y Parinacota hasta Los Ríos, y cada 5[km] para un caso específico de la Región Metropolitana. Luego, a partir de la creación de gráficos comparativos son estimados los períodos de retorno de cada sitio para las medidas de intensidad (IM) correspondientes al PGA y  $S_a$  para 1, 2 y 3 segundos. Finalmente, se crean mapas de períodos de retorno de estas IM y mapas de diferencia porcentual de la aceleración espectral de diseño respecto al UHS de 475 años.

A partir de los resultados, se obtuvo que tanto el período de retorno como la diferencia porcentual calculada son dependientes de la IM, zona sísmica y tipo de suelo, alcanzando valores máximos de períodos de retorno promedio superiores a 1000 años y diferencias porcentuales máximas que superan el 90%.

En promedio, para la IM correspondiente al PGA, el período de retorno de las intensidades de diseño para suelo tipo A son 55 años para la zona sísmica 1, 90 años para la zona sísmica 2, y 147 años para la zona sísmica 3. Por otro lado, para el suelo tipo D las intensidades de diseño son de 60 años para la zona sísmica 1, 106 años para la zona sísmica 2, y 173 años para la zona sísmica 3. De la misma forma, para la IM correspondiente a  $S_a(1s)$ , las intensidades de diseño para suelo tipo A son 141 años para la zona sísmica 1, 227 años para la zona sísmica 2, y 330 años para la zona sísmica 3. Y si es considerado un suelo tipo D los períodos de retorno promedio aumentan a 452 años para la zona sísmica 1, 846 años para la zona sísmica 2, y 1452 años para la zona sísmica 3.

Palabras claves: espectro de diseño, espectro de amenaza uniforme, probabilidad de excedencia, período de retorno, amenaza sísmica.

## 1 Introducción

Una de las consideraciones más importantes a tener en cuenta al momento de diseñar una estructura es el nivel de intensidad para el cual diseñar. En la actualidad, las normas sísmicas disponen de espectros de diseño en función de las características del suelo y de la estructura. Para el caso de Chile estos espectros fueron creados a partir de eventos observados y con el paso de los años han sido reajustados a partir de las respuestas estructurales obtenidas luego de grandes eventos, lo cual implica que no se tiene un conocimiento claro respecto a la recurrencia de los eventos de diseño.

Uno de los primeros documentos que dio paso a la creación de las normas sísmicas corresponde al ATC3-06 (Applied Technology Council [ATC], 1978), donde se hace la primera mención al criterio de un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años al momento de seleccionar los parámetros de diseño, lo cual se traduce en un período de retorno de 475 años. En el mismo documento es mencionado que el 10% de probabilidad de excedencia no fue considerado inicialmente para el cálculo de los parámetros, y el período de 50 años fue más bien seleccionado de manera arbitraria. A pesar de lo anterior, el mapa creado para uno de los parámetros correspondiente al “effective peak acceleration” (EPA) fue generado a partir del creado por otros autores (Algermissen y Perkins, 1976), el cual si fue pensado desde un inicio para el criterio ya mencionado.

Por otro lado, a nivel nacional, la norma NCh433 (Instituto nacional de normalización [INN], 2009) no hace mención en ningún momento al concepto de período de retorno, por lo que no se da a entender cuáles son las magnitudes asociadas a sus espectros. Sin embargo, la norma NCh2369 dice que “El criterio del 10% de excedencia durante un tiempo de exposición mínimo de 50 años, es el adoptado por las normas norteamericanas UBC y SEAOC y la chilena NCh433” (INN, 2003).

Adicionalmente, otros autores a través de sus investigaciones se han referido al hecho de que otros países tiendan a considerar el período de retorno de 475 años sin una justificación clara:

However, the seismic design codes of nearly every other country in the world, regardless of differences with the U.S.A. in terms of seismicity, construction practices and economic prosperity, have adopted – generally without any clear risk-based rationale – the 475-year return periods as the basis for the ground motions considered in design. (Bommer y Pinho, 2006)

En el presente trabajo se hará una estimación del período de retorno de los espectros de diseño buscando con ello dar una base científica a la norma respecto a la recurrencia de los eventos utilizados. Para esto se iniciará con la presentación de los objetivos de la investigación para luego dar paso al marco teórico, en donde se hará una breve explicación de los contenidos necesarios para la realización de los cálculos que den paso al cumplimiento de los objetivos. Dentro de dichos contenidos esta por un lado el cálculo de los espectros de diseño como tal, y por otro lado una breve explicación del análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA), finalizando con la distribución de Poisson para explicar la equivalencia de las probabilidades de excedencia con los períodos de retorno. Posterior a ello se hará la presentación de la metodología de trabajo dando a conocer las consideraciones a tener en cuenta para los cálculos y el plan de aplicación de las herramientas. Finalmente, serán presentados los resultados de la investigación mediante mapas de períodos de retorno y mapas de diferencia porcentual entre los espectros de diseño con el espectro de amenaza uniforme (UHS) de 475 años, dando paso con ello a las conclusiones de la investigación.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Proveer a la norma de diseño sísmico de edificios una base científica en cuanto a la recurrencia de los eventos de diseño, esto mediante la estimación de los períodos de retorno de los espectros de diseño, lo cual a su vez permite confirmar o refutar la afirmación sin justificación de que su magnitud es de 475 años.

## 2.2 Objetivos específicos

1. Realizar un análisis comparativo entre los espectros de la norma NCh433 y espectros de amenaza uniforme (UHS) obtenidos de un análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA) para distintos períodos de retorno.
2. Estimar la diferencia de los espectros de diseño con el UHS correspondiente al período de retorno de 475 años.
3. Crear mapas de períodos de retorno y diferencia porcentual entre los espectros de diseño y el UHS correspondiente a los 475 años, ambos asociados a distintas medidas de intensidad (IM).

## 3 Marco teórico

### 3.1 Espectro de diseño NCh433 y decreto supremo N°61

La norma NCh433 fue creada el año 1972 y fue posteriormente actualizada en los años 1996 y 2009. Sin embargo, luego del terremoto del 27 de febrero del 2010 fue necesario realizar otras nuevas modificaciones, dando paso a la creación del decreto supremo N°61 (DS61), el cual en conjunto con la norma NCh433 Of96 modificada en 2009 conforman finalmente la actual norma sísmica para edificios.

A partir de ambos documentos es determinado que el cálculo de los espectros de diseño se obtiene de las ecuaciones (1) y (2).

$$S_a = SA_0\alpha I \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1 + 4.5 \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^p}{1 + \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^3} \quad (2)$$

En donde:

$S_a$ : Espectro de aceleración

$I$ : Coeficiente relativo al edificio, cuyos valores se especifican en la Tabla 1 o Tabla 6.1 de la norma a partir de la clasificación de ocupación de edificios y otras estructuras de acuerdo a su importancia, uso y riesgo de falla de la sección 4.3 de la norma.

$A_0$ : Aceleración efectiva máxima. Sus valores se obtienen de la Tabla 2 o Tabla 6.2 de la norma a partir de la zonificación sísmica del país indicada en la sección 4.1 de la misma.

$\alpha$ : Factor de amplificación, se determina para cada modo de vibrar  $n$  a partir de la ecuación (2).

$T_n$ : Período de vibración del modo  $n$ .

$S, T_0, p$ : Parámetros relativos al tipo de suelo. Sus valores se obtienen de la Tabla 3 o sección 12.3 del DS61 a partir de la clasificación del tipo de suelo según la Tabla 4 o Tabla Clasificación sísmica del terreno de fundación del DS61.

**Tabla 1. Valor del coeficiente I (NCh433)**

Categoría del edificio	$I$
I	0.6
II	1.0
III	1.2
IV	1.2

**Tabla 2. Valor de la aceleración efectiva  $A_0$  (NCh433)**

Zona sísmica	$A_0$
1	0.20 g
2	0.30 g
3	0.40 g

**Tabla 3. Parámetros dependientes del tipo de suelo (DS61)**

Tipo de suelo	S	$T_0$ seg	$T'$ seg	n	p
A	0.90	0.15	0.20	1.00	2.0
B	1.00	0.30	0.35	1.33	1.5
C	1.05	0.40	0.45	1.40	1.6
D	1.20	0.75	0.85	1.80	1.0
E	1.30	1.20	1.35	1.80	1.0
F	*	*	*	*	*

**Tabla 4. Clasificación sísmica del terreno de fundación (DS61)**

Suelo tipo		$V_{s30}$ (m/s)	RQD	$q_u$ (MPa)	$(N_1)$ (golpes/pie)	$S_u$ (MPa)
A	Roca, suelo cementado	$\geq 900$	$\geq 50\%$	$\geq 10$ ( $\epsilon_{qu} \leq 2\%$ )		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	$\geq 500$		$\geq 0.40$ ( $\epsilon_{qu} \leq 2\%$ )	$\geq 50$	
C	Suelo denso o firme	$\geq 350$		$\geq 0.30$ ( $\epsilon_{qu} \leq 2\%$ )	$\geq 40$	
D	Suelo medianamente denso, o firme	$\geq 180$			$\geq 30$	$\geq 0.05$
E	Suelo de compacidad o consistencia mediana	$< 180$			$\geq 20$	$< 0.05$
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

### 3.2 Análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA)

Uno de los objetivos principales de los análisis sísmicos es poder estimar el nivel de intensidad a utilizar al momento de diseñar. El problema es que existe gran incertidumbre para una serie de parámetros a considerar, tales como la IM a utilizar, las magnitudes, distancias de un sitio a sus fuentes, entre otras. Por esta razón, con el propósito de incluir dichas incertidumbres en los cálculos es que se utilizan herramientas probabilísticas.

Este tipo de análisis se lleva a cabo en básicamente 5 pasos según lo descrito por Jack W. Baker (2013):

1. Identificar fuentes
2. Identificar magnitudes y asignar distribución
3. Identificar distancias del sitio a las fuentes y asignar distribución
4. Predecir las IMs en función de las magnitudes y distancias
5. Combinar lo anterior utilizando el Teorema de probabilidades totales

Para el primer paso es necesario conocer los distintos tipos de fallas, como ejemplo pueden ser consideradas tanto las fallas por subducción, las cuales pueden generar terremotos “outer-rise”, interplaca, intraplaca oceánica e intraplaca continental, como las fallas corticales.

Para el segundo paso se selecciona un rango de magnitudes a considerar de acuerdo con los eventos ocurridos históricamente en el sitio de estudio. La función de distribución nace a partir de la Ley de recurrencia de Gutenberg-Richter acotada de la ecuación (3) y (4), con la cual se puede obtener la función de distribución acumulada (CDF) mediante la ecuación (5), y finalmente, aplicando la derivada de esta última se llega a la función de densidad de probabilidad (PDF) de la ecuación (6).

$$\lambda_m = \lambda_{m0} \frac{e^{-\beta(m-m_{min})} - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}}{1 - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}} \quad (3)$$

$$\lambda_{m0} = e^{\alpha-\beta m_{min}} \quad (4)$$

$$F_M(m) = \frac{\lambda_{m0} - \lambda_m}{\lambda_{m0}} = \frac{1 - e^{-\beta(m-m_{min})}}{1 - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}} \quad (5)$$

$$f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_{min})}}{1 - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}} \quad (6)$$

Donde

$\lambda_m$ : Tasa de recurrencia o frecuencia anual promedio de un sismo de magnitud  $m$

$\lambda_{m0}$ : Tasa de recurrencia de la magnitud mínima  $m_{min}$

$\alpha, \beta$ : Parámetros a calibrar, relacionados a la zona de estudio

$m_{max}$ : Magnitud máxima a considerar

$m_{min}$ : Magnitud mínima a considerar

En el tercer paso del procedimiento se debe optar por una geometría de la falla (como una puntual, lineal o de superficie), y la función de distribución será dependiente de dicha geometría. Para programas computacionales se puede definir un área de falla, la cual es discretizada de tal manera que la distancia varía a medida que se recorre la falla hasta cubrirla totalmente.

Posteriormente, en el paso 4 la predicción de la IM es mediante la utilización de ecuaciones propuestas por varios autores, las cuales en algunos casos son llamadas Leyes de atenuación o GMPes.

Finalmente, al combinar los puntos anteriores con el Teorema de probabilidades totales se llega a la ecuación (7).

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_{fuentes}} \lambda(M_i > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x|m, r) f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dr dm \quad (7)$$

Donde:

$\lambda(IM > x)$ : Tasa anual de excedencia de la medida de intensidad IM al exceder un valor  $x$

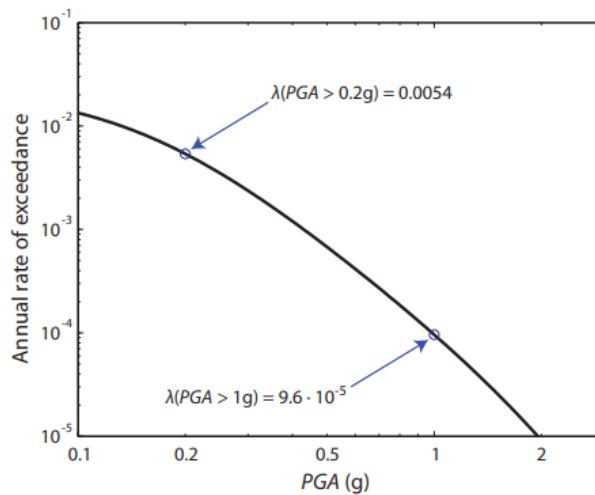
$\lambda(M_i > m_{min})$ : Tasa anual de excedencia de eventos cuyas magnitudes  $M_i$  exceden un valor mínimo  $m_{min}$

$P(IM > x|m, r)$ : Probabilidad de que una medida de intensidad IM exceda un valor  $x$  dada una magnitud  $m$  y distancia  $r$ . Obtenida del paso 4

$f_{M_i}(m)$ : Función de distribución de magnitud. Obtenida del paso 2

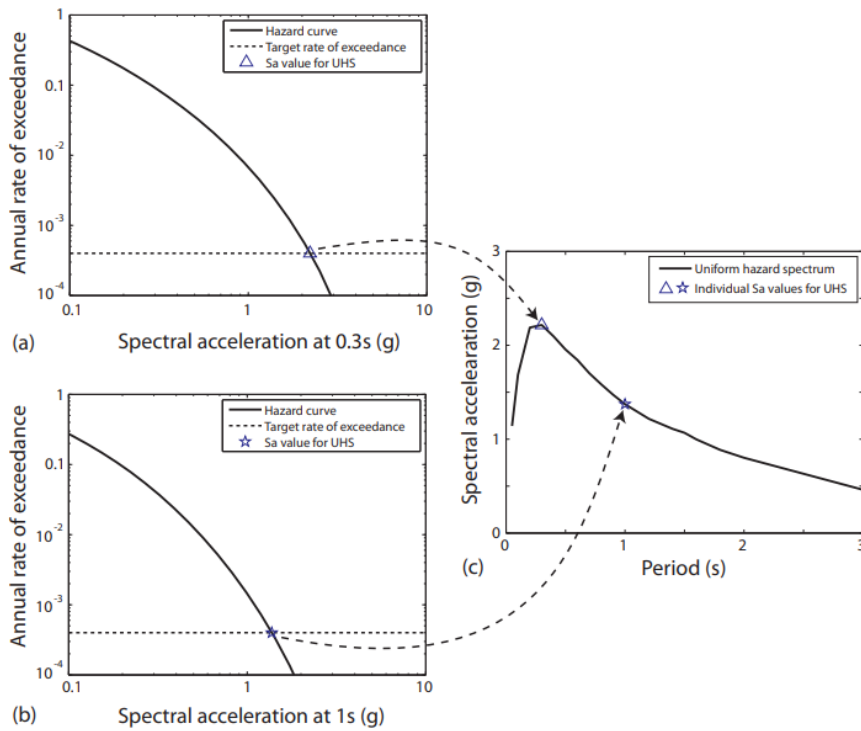
$f_{R_i}(r)$ : Función de distribución de distancia. Obtenida del paso 3

Graficando la ecuación (7) es que se obtiene la curva de amenaza sísmica para la IM seleccionada, un ejemplo es el de la Figura 1 extraída del documento de Baker (2013).



**Figura 1. Curva de amenaza sísmica para una medida de intensidad correspondiente al PGA.**

Por otro lado, considerando que un sitio puede contar con varias curvas de amenaza sísmica donde cada una representa una IM distinta, se puede crear otro tipo de resultado a partir de ello conocido como el espectro de amenaza uniforme. Este se obtiene de asumir una tasa anual de excedencia específica (como puede ser el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años llevado a su magnitud anual) lo que se traduce en una recta horizontal en cada curva de amenaza como puede verse en la Figura 2 (a) y (b). Luego, a partir de la intersección de dicha recta con la curva de amenaza son extraídos los valores de la IM y del período asociado, obteniendo de ello el espectro de amenaza uniforme al graficar el valor de la IM en función del período, tal como puede apreciarse en la Figura 2 (c).



**Figura 2. (a) Curva de amenaza sísmica para Sa(0.3s). (b) Curva de amenaza sísmica para Sa(1s). (c) Espectro de amenaza uniforme.**

### 3.3 Distribución de Poisson

Mediante la distribución de Poisson es que se puede contar el número de ocurrencias  $x$  de un evento cuya tasa de recurrencia promedio es  $\lambda$ , y esto para un intervalo de tiempo  $t$ . La función de probabilidad, la media y la desviación estándar son las correspondientes a las ecuaciones (8), (9) y (10) respectivamente.

Función de probabilidad:

$$P(X = x) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t}; \quad x = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (8)$$

Media:

$$\mu_x = \lambda t \quad (9)$$

Desviación estándar:

$$\sigma_x = \sqrt{\lambda t} \quad (10)$$

A partir de ello se puede calcular la probabilidad de que ocurra al menos 1 evento en los próximos  $t$  años utilizando la ecuación (11).

$$\begin{aligned} P(X \geq 1 \text{ en } t \text{ años}) &= 1 - P(X = 0 \text{ en } t \text{ años}) \\ P(X \geq 1 \text{ en } t \text{ años}) &= 1 - e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (11)$$

Por otro lado, se define el período de retorno como:

$$Tr = \frac{1}{\lambda} \quad (12)$$

Y mediante el despeje de  $\lambda$  en la ecuación (11) y su reemplazo en la ecuación (12) se obtiene la siguiente expresión:

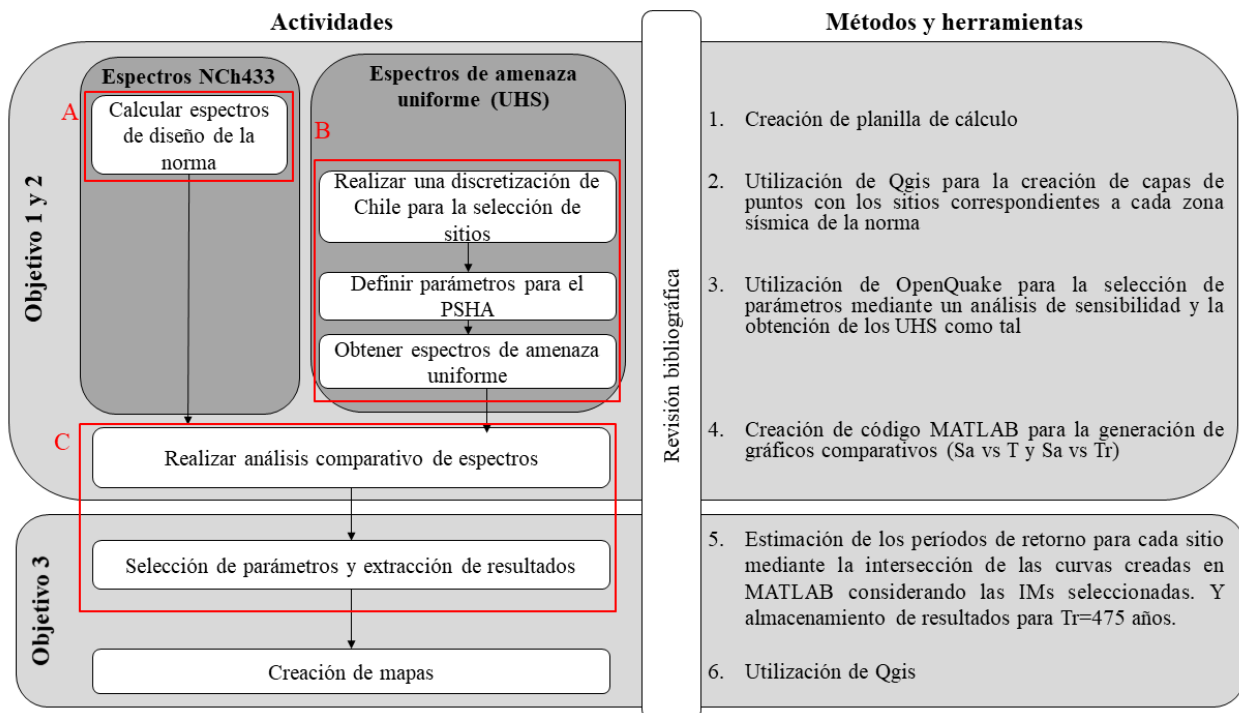
$$Tr = - \frac{t}{\ln(1 - P(X \geq 1 \text{ en } t \text{ años}))} \quad (13)$$

Finalmente, a partir de la ecuación (13) es posible obtener el período de retorno al establecer una probabilidad de excedencia específica dentro de un período de tiempo  $t$ .

## 4 Metodología

### 4.1 General

En la Figura 3 se muestra un esquema resumido de las actividades agrupadas por objetivo a cumplir, y cada una con sus respectivos métodos y herramientas a utilizar para el desarrollo de la investigación.



**Figura 3. Esquema de la metodología de trabajo.**

En los 2 primeros objetivos específicos es necesario por un lado hacer las actividades requeridas para la obtención de los espectros de la norma, y por otro lado, las requeridas para la obtención de los UHS. Para ello se utilizan planillas de cálculo para el primer caso, y los softwares QGis y OpenQuake para el segundo. Teniendo ambos es posible realizar el análisis comparativo utilizando para ello MATLAB, con el cual se crean gráficos comparativos. Luego, para el último objetivo específico primero es necesario seleccionar los parámetros a considerar y extraer sus resultados para finalmente crear los mapas como tal utilizando nuevamente para ello QGis.

## 4.2 Plan de aplicación de herramientas

De la Figura 3 se observan actividades agrupadas en color rojo con las letras A, B y C, a partir de ello, a continuación, se describirán las consideraciones asumidas por cada grupo de actividades y el plan de aplicación relacionándolo con el marco teórico presentado previamente.

### Grupo A:

Este grupo de actividades está relacionado a la obtención de los espectros de diseño. Para efectos de esta investigación se harán las siguientes consideraciones:

- 1) Se estudiarán las estructuras con categoría de ocupación II
- 2) Se trabajará con las 3 zonas sísmicas descritas por la norma
- 3) Se estudiarán los suelos tipo A, B, C y D según el DS61

Dicho lo anterior, los parámetros para el cálculo son los de la Tabla 5. A partir de ello se obtiene un total de 12 espectros de diseño, donde cada uno es para una zona sísmica y tipo de suelo específico.

**Tabla 5: Parámetros de los espectros de diseño**

Consideración	Parámetro que define	Clasificación	Valor
1	$I$	-	1,0
2	$A_o$	Zona 1	0,2 $g$
		Zona 2	0,3 $g$
		Zona 3	0,4 $g$
3	$S$	Suelo A	0,90
		Suelo B	1,00
		Suelo C	1,05
		Suelo D	1,20
	$T_o$	Suelo A	0,15
		Suelo B	0,30
		Suelo C	0,40
		Suelo D	0,75
	$p$	Suelo A	2,0
		Suelo B	1,5
		Suelo C	1,6
		Suelo D	1,0

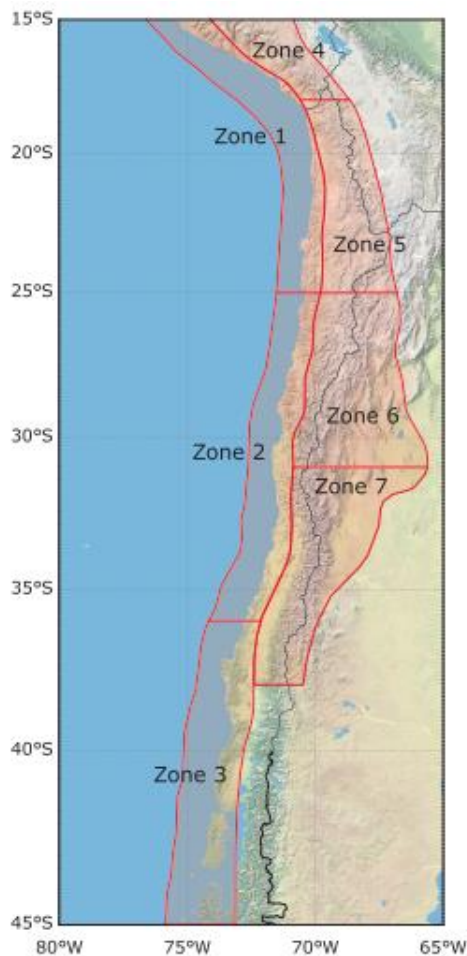
### Grupo B:

Este grupo incluye todas las actividades requeridas para la obtención de los UHS. La primera actividad consiste en realizar la discretización de sitios de estudio a incluir en el software OpenQuake, para lo cual se utiliza el software QGis. Se trabajará con 2 tipos de discretización, una discretización general para Chile y una discretización más fina para un estudio específico de la Región Metropolitana. Las consideraciones asumidas son las siguientes:

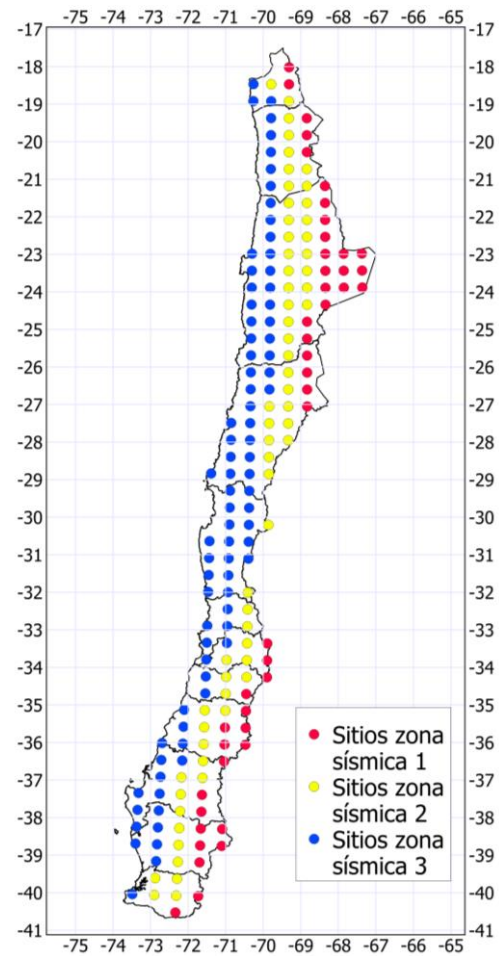
- 1) Sitios comprendidos en las zonas de subducción de acuerdo a Poulos et al. (2019) de la Figura 4. Razón por la cual para el estudio general de Chile se considerarán sitios desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Los Ríos.
- 2) Sitios uniformemente distribuidos, espaciados cada 50 [km] para el estudio general de Chile. Figura 5.
- 3) Sitios uniformemente distribuidos, espaciados cada 5 [km] para el estudio particular de la Región Metropolitana. Figura 6.
- 4) Sitios clasificados según zona sísmica de la norma.
- 5) Sitios clasificados por tipo de suelo según  $V_{s30}$  y clasificación SC (site classification) de Idini et al. (2017) para las ecuaciones de predicción de movimiento sísmico en las zonas de subducción de Chile. Ver Tabla 6.

**Tabla 6: Clasificación de tipos de suelos**

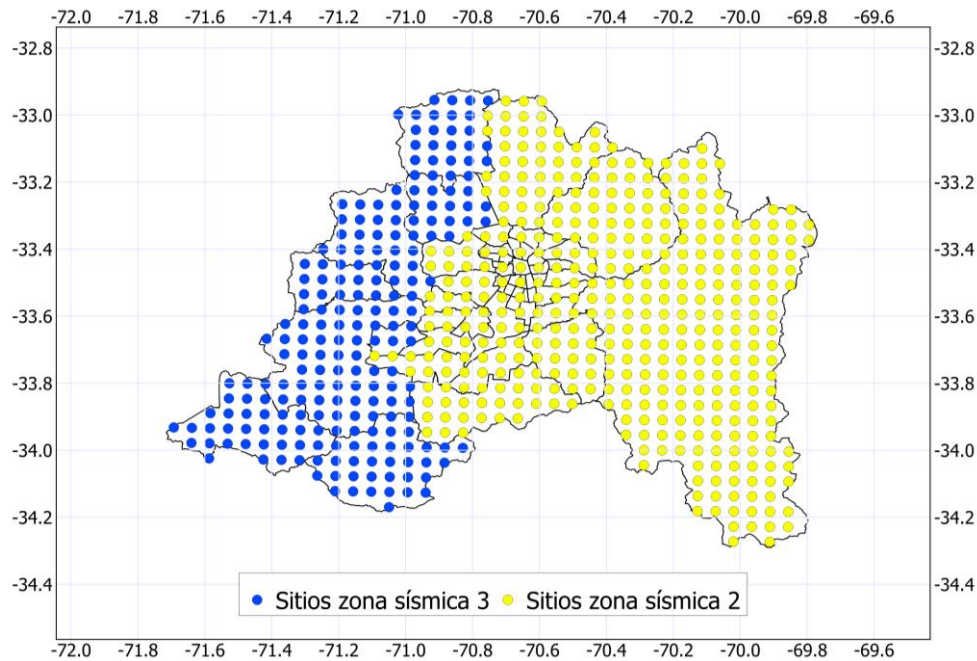
Tipo de suelo	$V_{s30}$	Soiltype
A	1000	2
B	700	3
C	425	3
D	265	4



**Figura 4: Zonas de subducción de acuerdo a Poulos et al. (2019)**



**Figura 5: Discretización de sitios para el estudio general de Chile**



**Figura 6: Discretización de sitios para el estudio específico de la Región Metropolitana.**

Como segunda actividad está la definición de los parámetros para el PSHA en OpenQuake. Para esto se considerará lo siguiente:

- 1) Probabilidades de excedencia o períodos de retorno de la Tabla 7.
- 2) Períodos de vibración desde los 0 a 4 segundos.
- 3) Para las fuentes y sus leyes de recurrencia serán consideradas las zonas de subducción interplaca e intraplaca del modelo de Poulos et al. (2019) en conjunto con las fallas corticales del proyecto SARA de OpenQuake.
- 4) Leyes de atenuación para subducción de Idini et al. (2017) y Montalva et al. (2016), con ponderación del 50% cada una. Y leyes de atenuación para fallas corticales de Akkar et al. (2014) y Boore et al. (2014), con ponderación del 50% cada una.
- 5) Distancia máxima de 500 [km] para casos de subducción y de 200 [km] para fallas corticales.
- 6) Análisis de sensibilidad para la discretización de ruptura.

**Tabla 7: Probabilidades de excedencia o períodos de retorno considerados para el PSHA**

Tiempo de investigación [años]	Período de retorno (Tr) [años]	Probabilidad de excedencia (poe) [%]
50	10	0,993
50	25	0,865
50	50	0,632
50	100	0,393
50	200	0,221
50	300	0,154
50	400	0,118
50	475	0,100
50	500	0,095
50	600	0,080
50	700	0,069

Tiempo de investigación [años]	Período de retorno (Tr) [años]	Probabilidad de excedencia (poe) [%]
50	800	0,061
50	900	0,054
50	1000	0,049
50	5000	0,010
50	10000	0,005

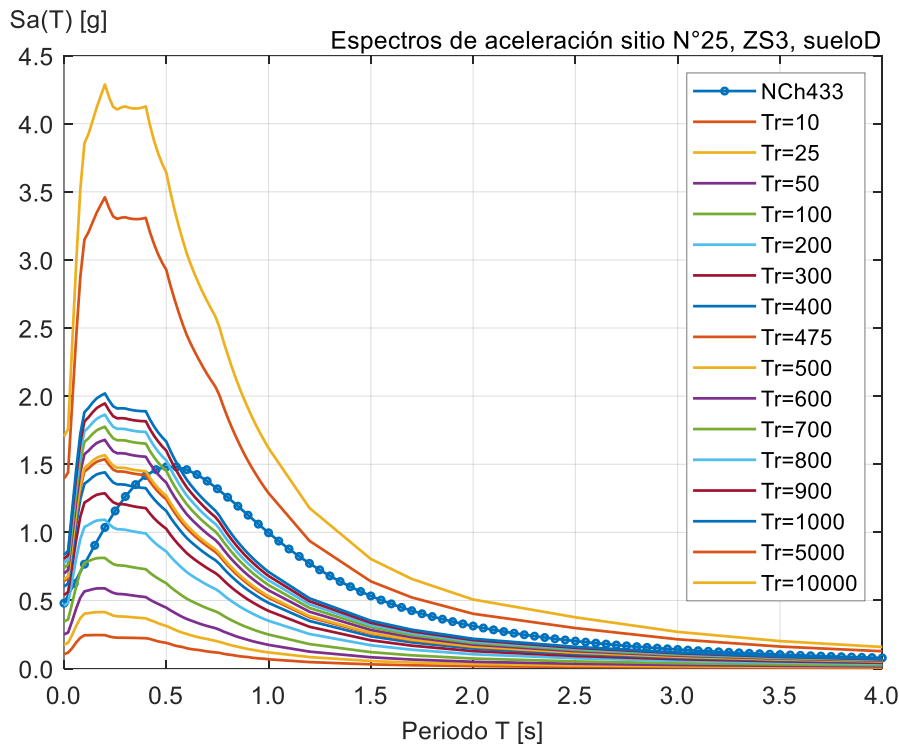
Teniendo definidos los parámetros ya mencionados e incluidos en los archivos de ejecución de OpenQuake se obtiene finalmente un total de 16 UHS (uno por cada período de retorno), y esto para cada sitio de análisis.

### Grupo C:

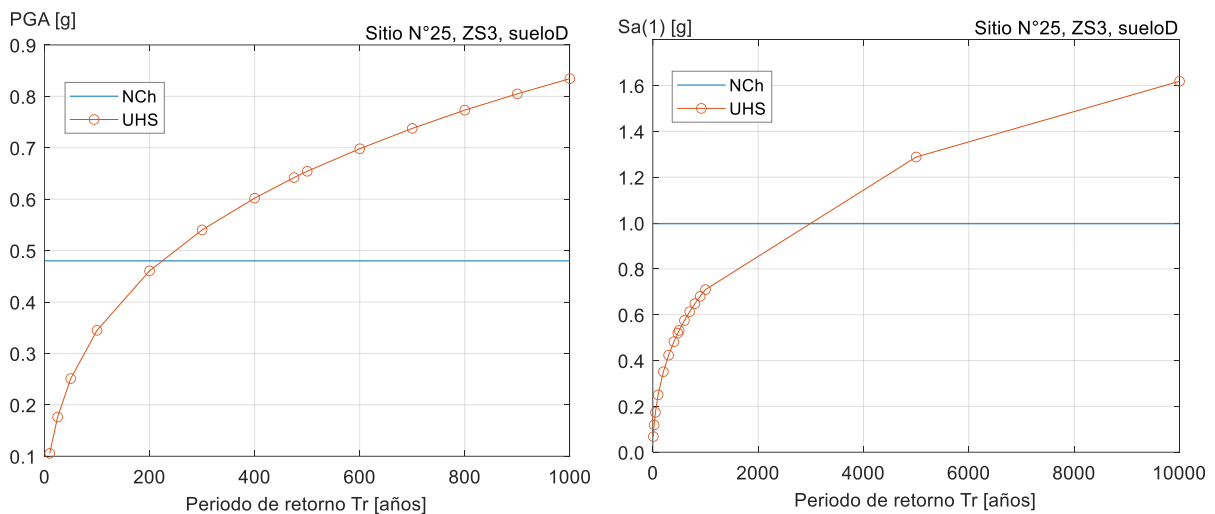
Este último grupo de actividades está centrado por un lado en el análisis comparativo de los espectros de diseño con los UHS obtenidos del programa, y por otro lado en la selección de los parámetros para la extracción de resultados a representar mediante los mapas.

Para el análisis comparativo se hacen 2 tipos de análisis, uno general en donde se compara cualitativamente cada espectro de diseño con los 16 UHS obtenidos de OpenQuake, esto graficando mediante MATLAB los espectros de aceleración en función de los períodos de vibración como se puede ver en el ejemplo de la Figura 7 para un sitio ubicado en la zona sísmica 3 y suelo tipo D.

Sin embargo, considerando que el valor del período de retorno del espectro varía con el período de vibración, tal como puede verse en la Figura 7, se hace un análisis específico para ciertos valores de medida de intensidad. Para efectos de esta investigación se considerarán las medidas de intensidad de PGA, Sa(1s), Sa(2s) y Sa(3s), y para cada una de ellas se crean gráficos de la ordenada espectral en función del período de retorno, lo cual es equivalente a trazar una recta vertical en la Figura 7 para los períodos de 0, 1, 2 y 3 segundos almacenando en el eje x el período de retorno asociado a cada curva, y en el eje y el valor del espectro de aceleración para ese período de vibración específico. Véase la Figura 8 como ejemplo del mismo sitio ya mencionado considerando las IM de PGA y Sa(1s).



**Figura 7: Espectro de aceleración vs período de vibración T para un sitio ubicado en la Región de Antofagasta dentro de la zona sísmica 3 con suelo tipo D**



**Figura 8: PGA y Sa(1s) vs período de retorno Tr para un sitio ubicado en la Región de Antofagasta dentro de la zona sísmica 3 con suelo tipo D**

Por último, de la intersección de las curvas de la Figura 8 se obtiene finalmente un valor estimado del período de retorno del espectro de diseño para la medida de intensidad seleccionada, lo cual es calculado y almacenado en un archivo generado por MATLAB y utilizado posteriormente en QGIS para la creación de los mapas de períodos de retorno.

De la misma manera, son almacenados los valores de aceleración espectral de los espectros de diseño para las medidas de intensidad seleccionadas y los valores de aceleración del UHS cuyo período de retorno es de 475 años. Con dichos resultados es calculada la diferencia porcentual que es entregada en

el mismo archivo generado por MATLAB mediante la ecuación (14), y que es utilizado de igual forma para la creación de los mapas de diferencia porcentual.

$$\Delta = \frac{S_a(Nch) - S_a(UHS)}{S_a(UHS)} \cdot 100\% \quad (14)$$

## 5 Resultados

### 5.1 Períodos de retorno de Chile

Con el propósito de realizar un análisis cualitativo por tipo de suelo se presentan a continuación los mapas de períodos de retorno agrupados por medida de intensidad para el caso general de Chile.

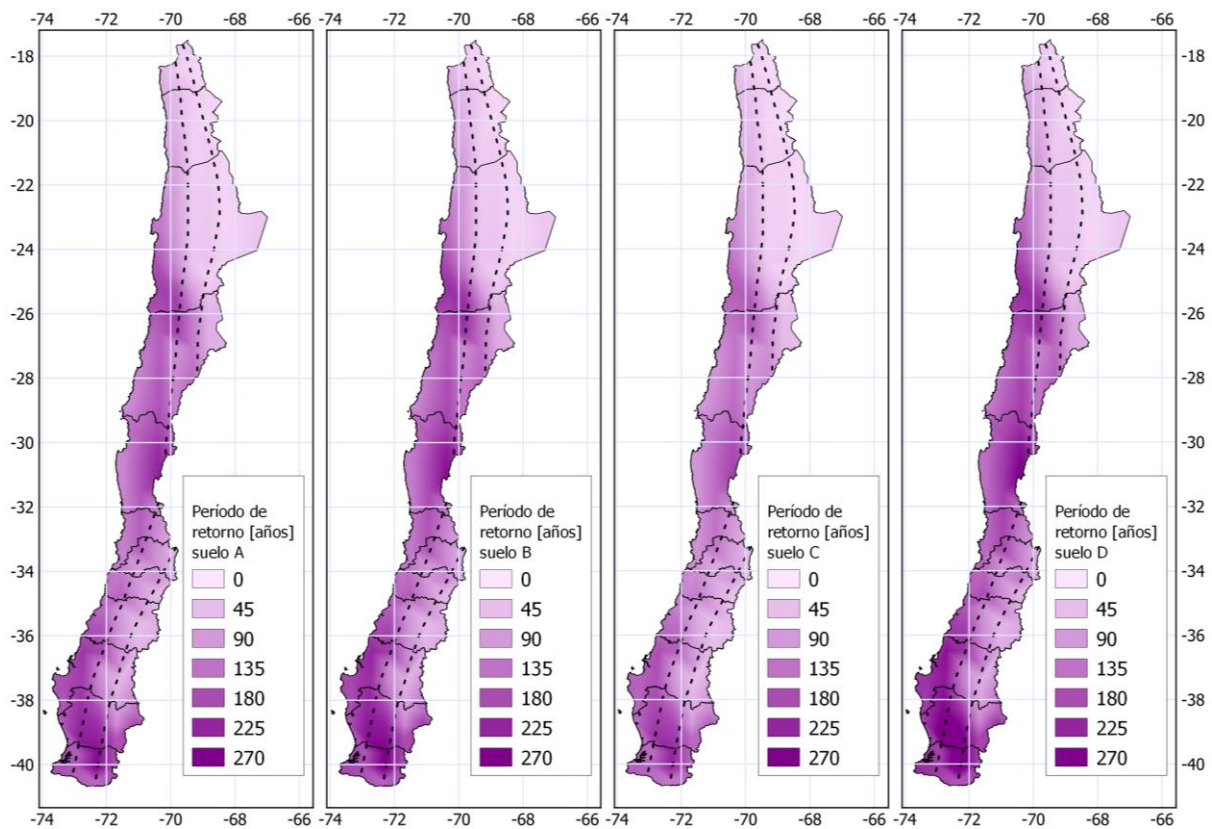


Figura 9: Mapas de períodos de retorno del caso general de Chile para la IM de PGA

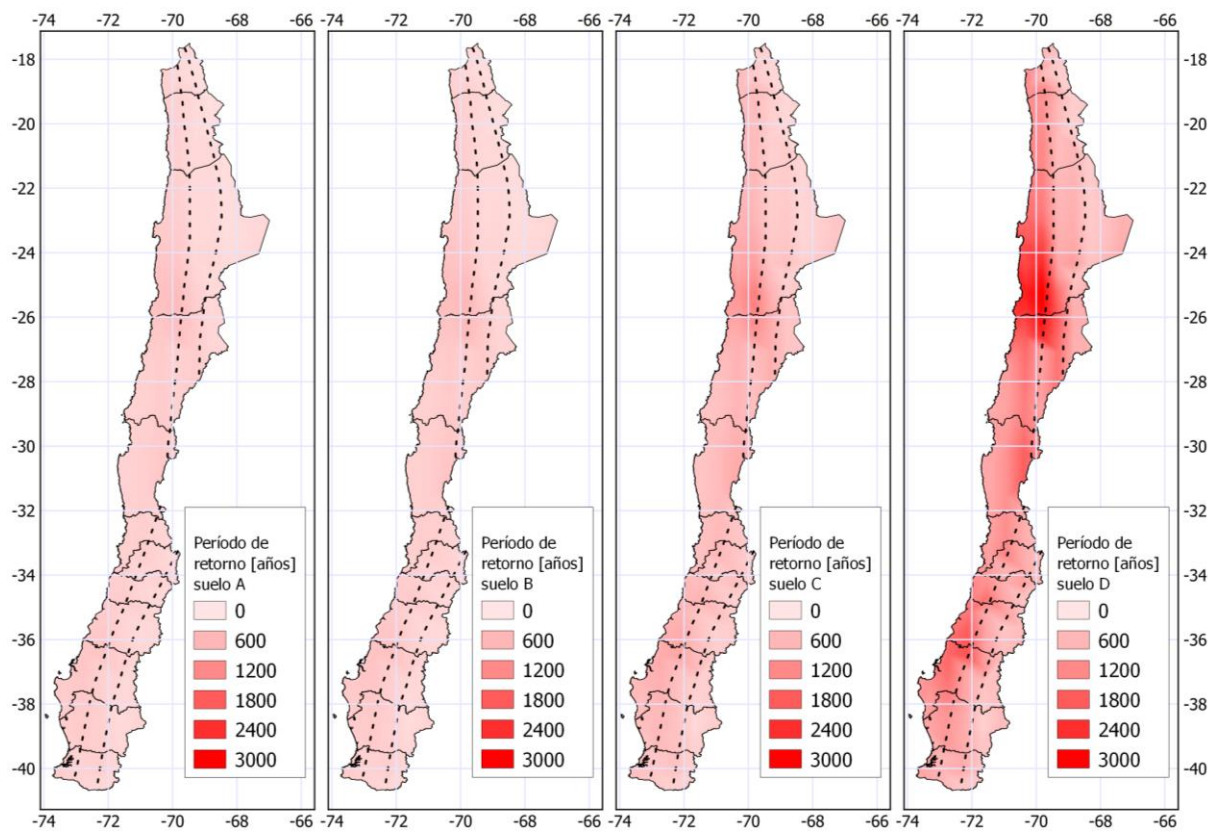


Figura 10: Mapas de períodos de retorno del caso general de Chile para la IM de Sa(1s)

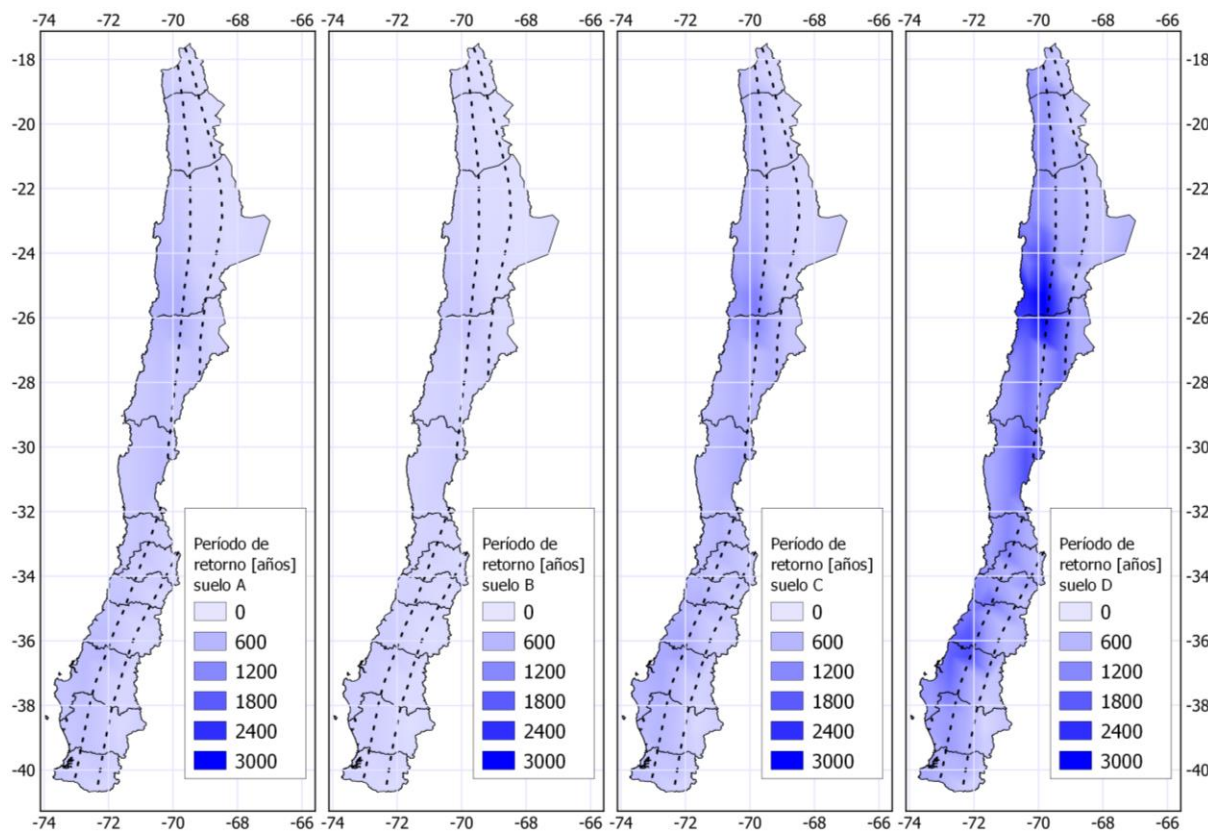
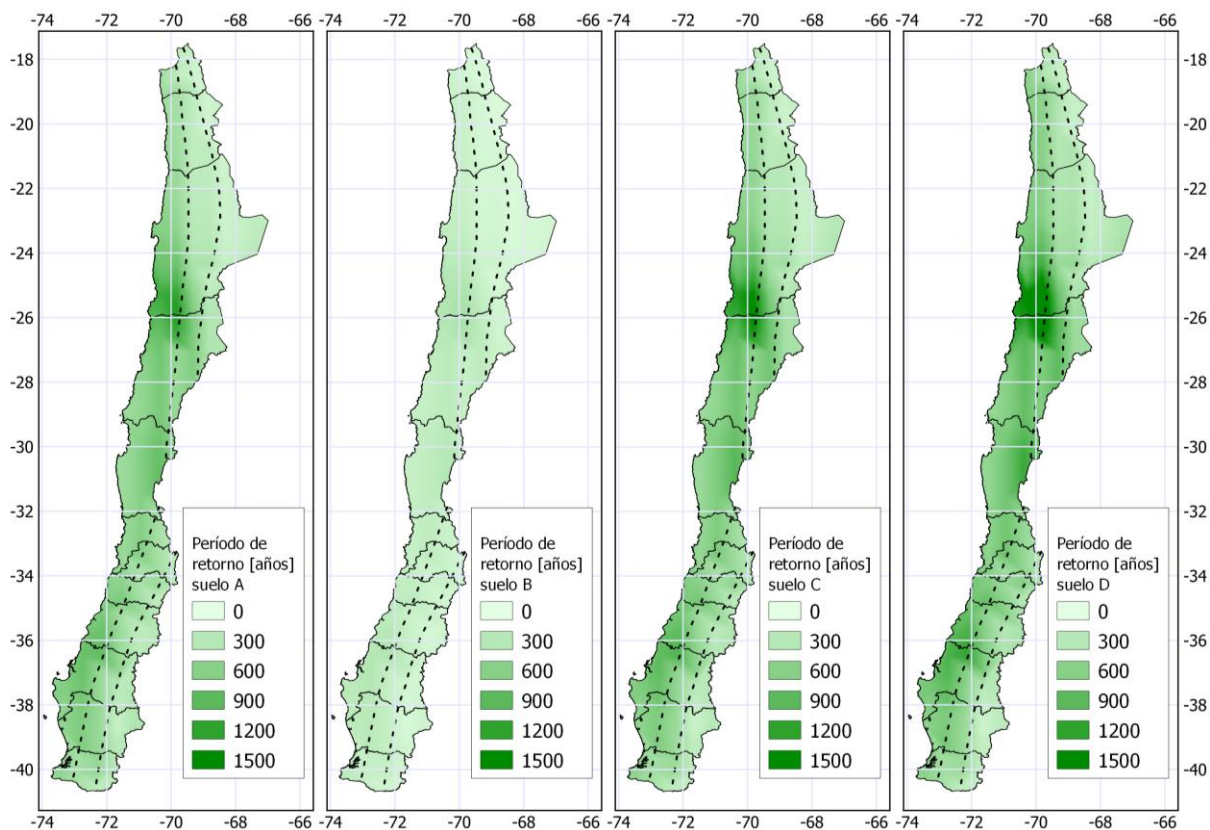


Figura 11: Mapas de períodos de retorno del caso general de Chile para la IM de Sa(2s)



**Figura 12: Mapas de períodos de retorno del caso general de Chile para la IM de Sa(3s)**

De los resultados es posible observar que para la IM de PGA no existe una diferencia notoria en el rango de los períodos de retorno según el tipo de suelo, alcanzando valores máximos en los mismos sitios para los 4 mapas, los cuales se ubican en la frontera entre la Región de Antofagasta y la Región de Atacama, en el límite cordillerano de la Región de Coquimbo, y en sitios de la Región de la Araucanía y Región de Los Ríos.

Por otro lado, para períodos superiores se observa que influye el tipo de suelo en el rango de períodos de retorno presentes a lo largo del país. Para las IMs asociadas a los períodos de 1 y 2 segundos se tiene que en los suelos A y B el rango de períodos de retorno se encuentra desde los 0 a 600 años. Para el suelo tipo C se alcanzan valores superiores en los sitios ubicados en la frontera de la Región de Antofagasta y la Región de Atacama rondando los 1200 años. Y, por último, en el suelo tipo D se alcanzan los valores máximos con magnitudes cercanas a los 3000 años para los mismos sitios ya mencionados.

Finalmente, para la IM asociada al período de 3 segundos se observa que, si bien los suelos A y B siguen siendo los que presentan el rango de períodos de retorno menor dentro de los 4 mapas, para el suelo tipo B se obtienen los valores mínimos con un rango de 0 a 300 años.

Adicionalmente, a partir de la base de datos generada por el análisis comparativo realizado en MATLAB son calculados los valores de períodos de retorno promedios clasificados según IM, zona sísmica según la NCh433, y tipo de suelo según el DS61. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

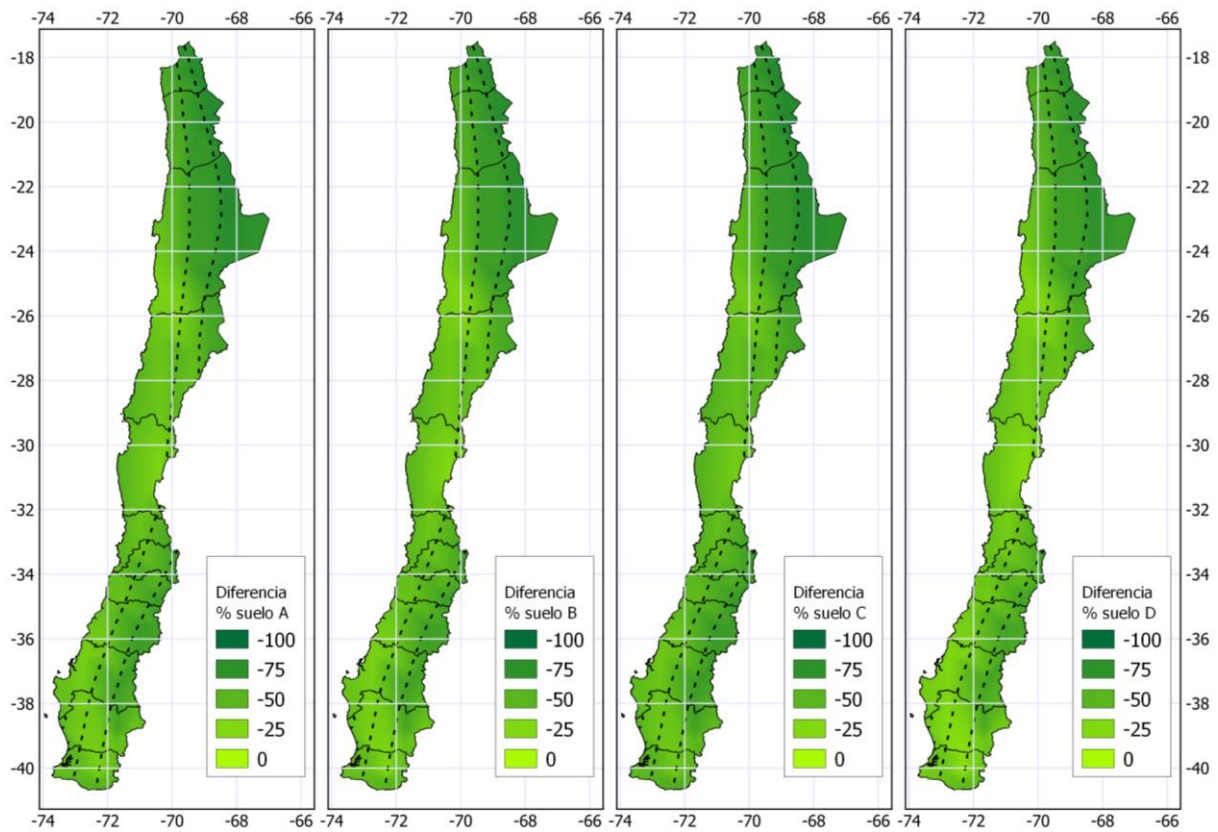
**Tabla 8: Períodos de retorno promedio para el caso general de Chile**

<b>PERÍODO DE RETORNO PROMEDIO [AÑOS]</b>					
<b>IM</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Zona sísmica NCh433</b>			<b>Promedio</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>PGA</b>	<b>A</b>	55	90	147	106
	<b>B</b>	57	97	159	114
	<b>C</b>	45	76	124	89
	<b>D</b>	60	106	173	124
<b>Sa(1s)</b>	<b>A</b>	141	227	330	251
	<b>B</b>	152	247	358	272
	<b>C</b>	270	450	650	493
	<b>D</b>	452	846	1452	1013
<b>Sa(2s)</b>	<b>A</b>	170	287	442	326
	<b>B</b>	109	178	263	198
	<b>C</b>	241	431	664	486
	<b>D</b>	427	848	1393	983
<b>Sa(3s)</b>	<b>A</b>	234	417	670	482
	<b>B</b>	106	174	257	194
	<b>C</b>	253	466	736	532
	<b>D</b>	285	534	837	606

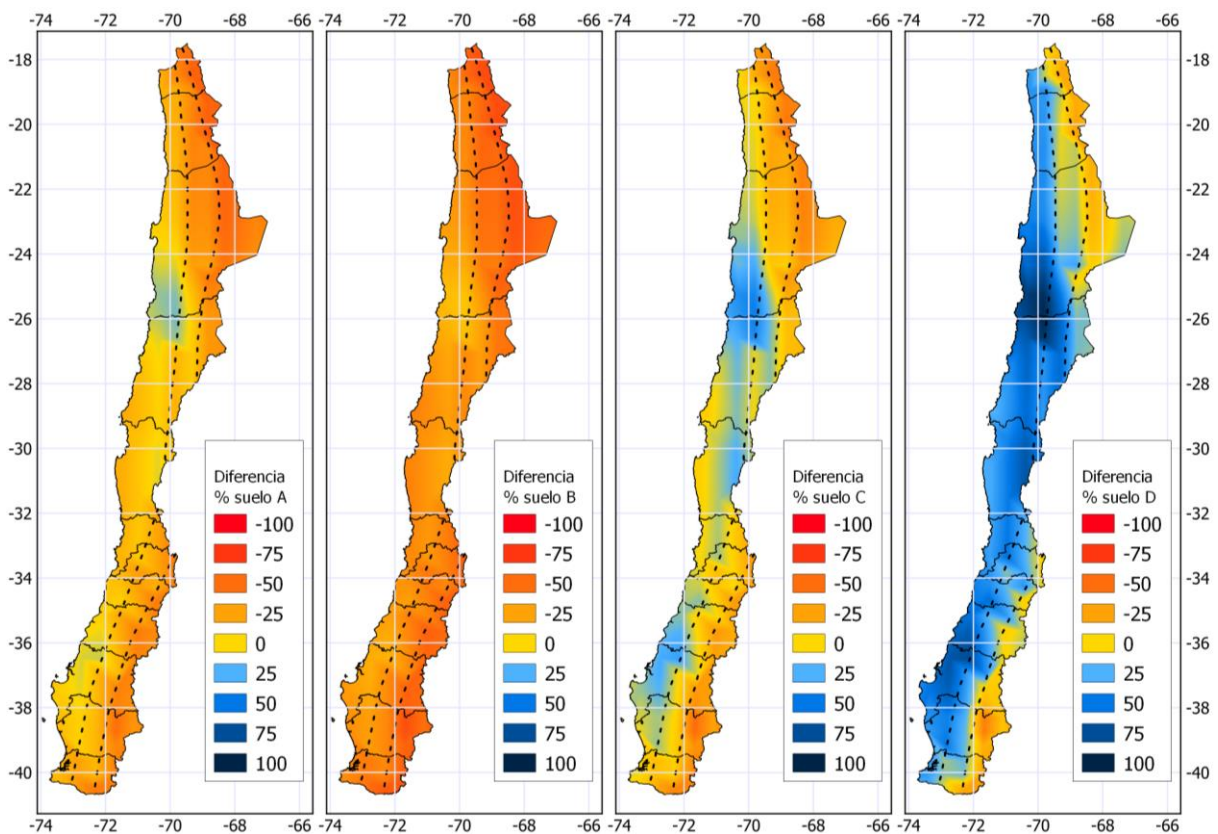
De dichos resultados se observa que los mayores períodos de retorno se dan en la zona sísmica 3 correspondiente a la zona costera de Chile, en los suelos tipo D, y en los períodos de vibración de 1 y 2 segundos superando los 1000 años.

## **5.2 Diferencia porcentual de la aceleración espectral de diseño para Chile**

Recordando que parte de esta investigación nace de la suposición que muchos profesionales tienen respecto al período de retorno de los espectros de diseño, donde asumen que estos están basados en un período de retorno de 475 años, es que se crean mapas de diferencia porcentual de la aceleración espectral de diseño respecto al UHS de 475 años para las IMs de PGA y Sa(2s), los cuales se muestran a continuación.



**Figura 13: Diferencia porcentual de la aceleración espectral de diseño respecto al del UHS de 475 años para la IM de PGA en el caso general de Chile**



**Figura 14: Diferencia porcentual de la aceleración espectral de diseño respecto al del UHS de 475 años para la IM de Sa(2s) en el caso general de Chile**

Para el caso del PGA se observa que no existe mayor influencia en el tipo de suelo, alcanzando las mayores diferencias porcentuales en los sitios ubicados en la zona norte de Chile, específicamente en el sector cordillerano desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Antofagasta (zona sísmica 1). Es importante destacar que para esta IM todas las diferencias porcentuales tienen valores negativos, lo cual indica, de acuerdo con la ecuación (14), que la ordenada espectral de diseño es menor a la obtenida del UHS de 475 años en todos los sitios estudiados.

Por otro lado, para la IM asociada al período de 2 segundos se observa que las diferencias porcentuales máximas se mantienen en el mismo sector ya mencionado para los suelos A y B, ambos casos con ordenada espectral de diseño menor a la del UHS de 475 años (diferencia porcentual negativa). En el suelo tipo C se tiene un comportamiento más homogéneo de las diferencias porcentuales a lo largo de Chile, con valores que no superan el 50% tanto negativo como positivo. Por último, en el suelo tipo D se alcanzan los máximos absolutos para esta IM con magnitudes entre el 75 y 100% para los sitios ubicados en la frontera de la Región de Antofagasta y Región de Atacama.

A modo de cuantificar y resumir los resultados de diferencias porcentuales considerando las 4 IM seleccionadas se presenta la Tabla 9.

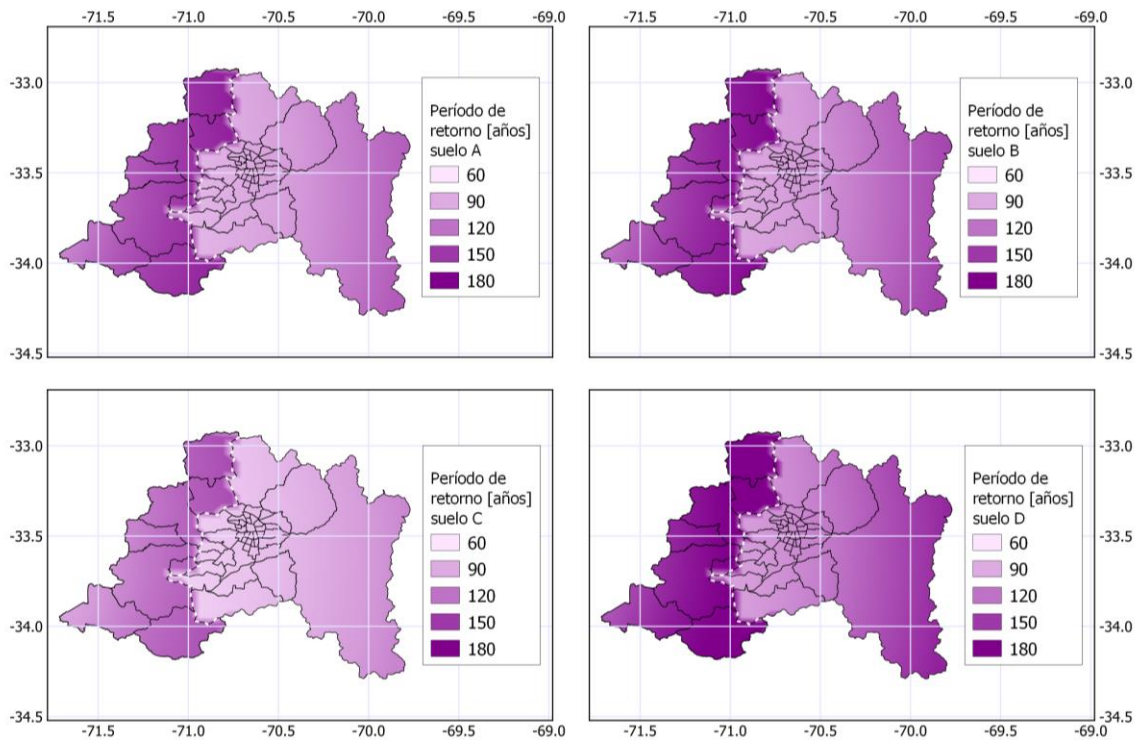
**Tabla 9: Diferencias porcentuales promedio y máxima de la aceleración espectral de diseño respecto a la del UHS de 475 años para el caso general de Chile**

DIFERENCIA PORCENTUAL DE ACELERACIÓN ESPECTRAL									
IM	Suelo	Zona sísmica NCh433						Total	
		1		2		3			
		% prom	% máx	% prom	% máx	% prom	% máx	% prom	% máx
PGA	A	-68	-80	-55	-71	-41	-61	-52	-80
	B	-66	-79	-53	-70	-39	-59	-50	-79
	C	-70	-81	-58	-73	-45	-63	-55	-81
	D	-63	-77	-50	-68	-36	-56	-47	-77
Sa(1s)	A	-48	-60	-32	-45	-18	-34	-30	-60
	B	-45	-59	-28	-41	-14	-32	-26	-59
	C	-25	-49	-3	24	14	48	-1	-49
	D	-4	-28	26	58	52	92	30	92
Sa(2s)	A	-43	-57	-23	-40	-5	-21	-20	-57
	B	-56	-67	-41	-53	-27	-40	-39	-67
	C	-30	-50	-6	-24	15	47	-2	-50
	D	-7	-42	26	62	53	97	30	97
Sa(3s)	A	-33	-51	-8	-30	16	45	-4	-51
	B	-58	-69	-42	-56	-28	-41	-40	-69
	C	-29	-48	-2	25	20	53	1	53
	D	-24	-53	4	35	27	64	7	64

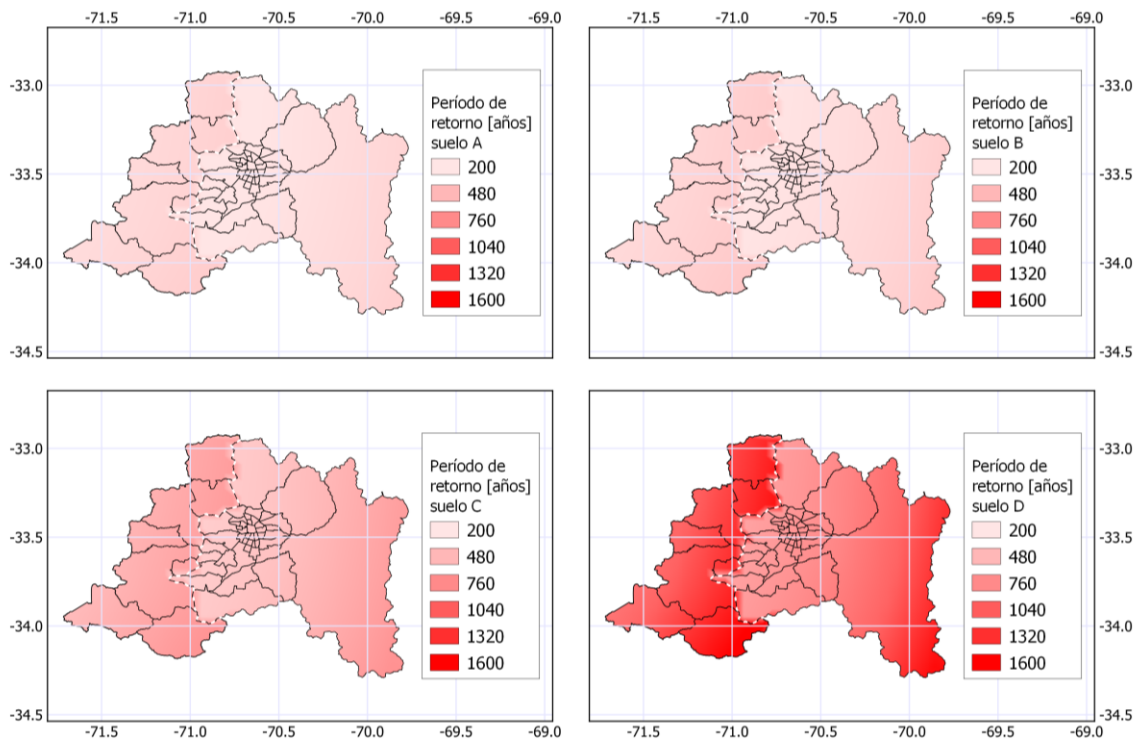
En promedio las diferencias porcentuales negativas, es decir los casos en que es subestimada la aceleración espectral de diseño respecto a la del UHS de 475 años, no superan (en valor absoluto) el 55%, con valores máximos en la IM del PGA. Por otro lado, en promedio las magnitudes positivas, es decir los casos en que la aceleración espectral de diseño es sobrestimada respecto a la del UHS de 475 años, no supera el 30%, no obstante, si bien la magnitud promedio es menor, las mayores diferencias porcentuales absolutas se dan en estos casos, específicamente en los suelos tipo D y zona sísmica 3 alcanzando magnitudes sobre el 90% de diferencia.

### 5.3 Períodos de retorno de la Región Metropolitana

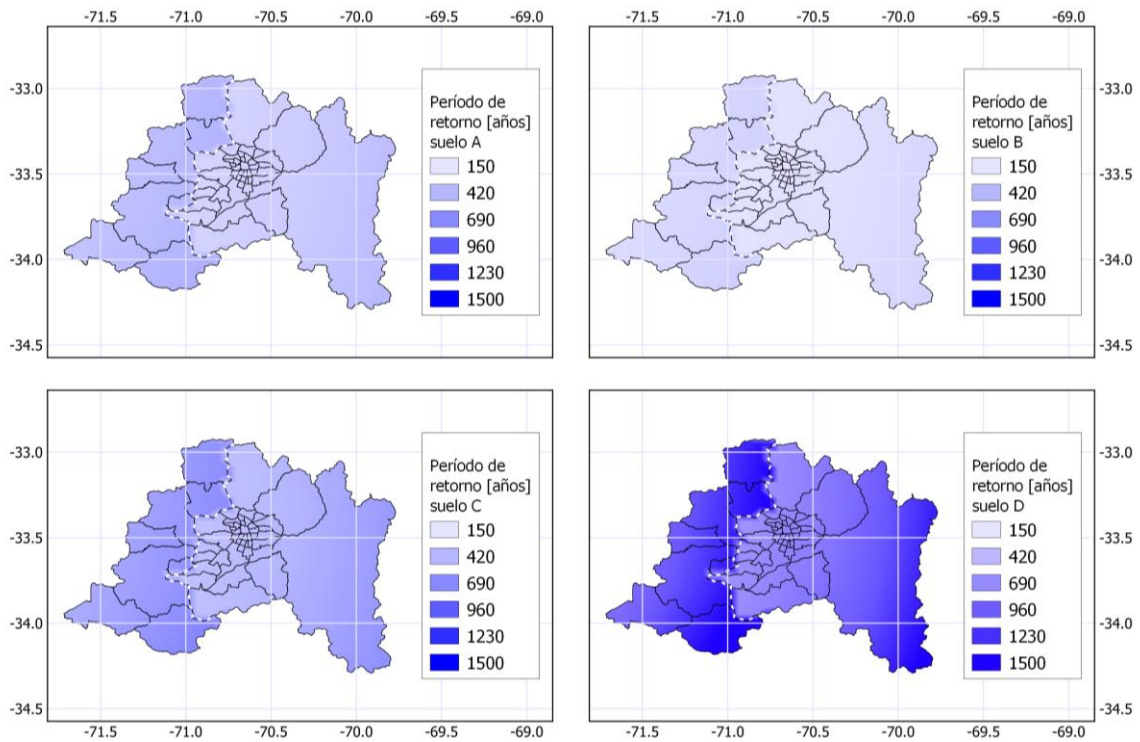
Repitiendo el procedimiento para la Región Metropolitana se presentan los siguientes resultados.



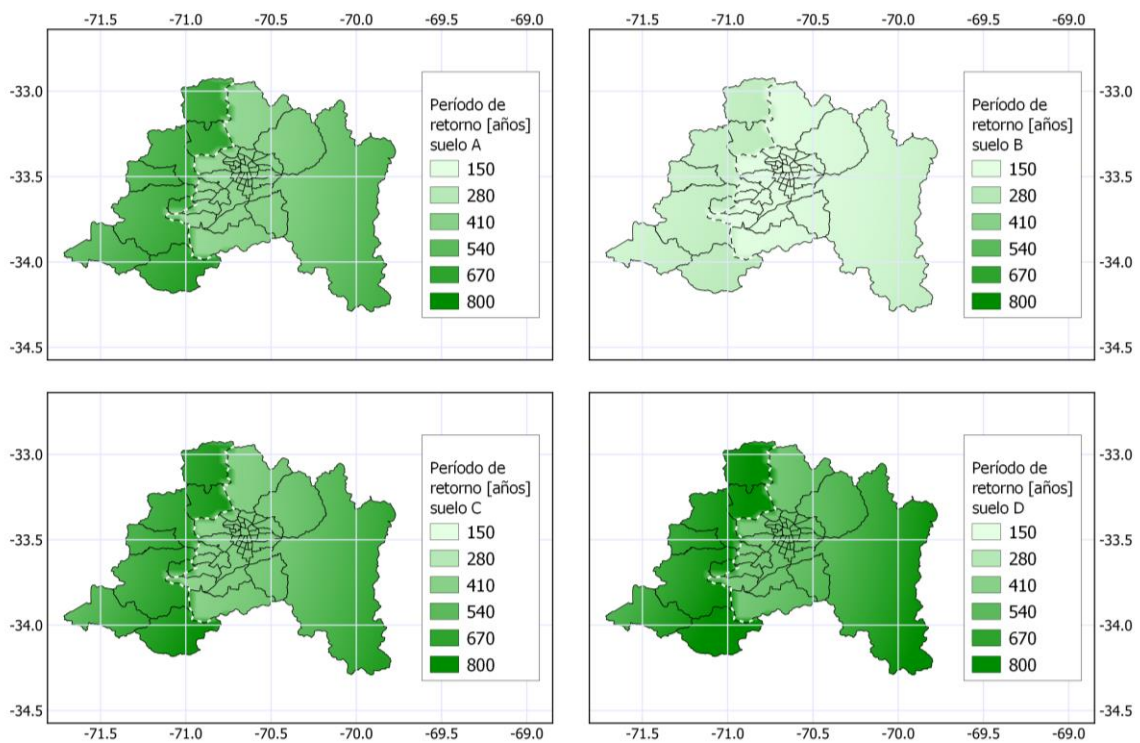
**Figura 15: Mapas de período de retorno del caso particular de la Región Metropolitana para la IM de PGA**



**Figura 16: Mapas de período de retorno del caso particular de la Región Metropolitana para la IM de Sa(1s)**



**Figura 17: Mapas de período de retorno del caso particular de la Región Metropolitana para la IM de Sa(2s)**



**Figura 18: Mapas de período de retorno del caso particular de la Región Metropolitana para la IM de Sa(3s)**

En todos los mapas es posible apreciar el cambio de la zona sísmica (demarcada por la línea segmentada), obteniendo siempre los períodos de retorno máximos en la zona 3 (a la izquierda de la línea segmentada), y por otro lado, dentro de la zona 2 se tiende a tener valores máximos en los sitios más cercanos a la cordillera, tendiendo a disminuir los períodos de retorno a medida que se acerca a las comunas de Santiago.

Según el tipo de suelo, se tiene que en todas las IMs se alcanzan los períodos de retorno máximos en los suelos tipo D. Si bien para el PGA y Sa(3s) no se observa una clara influencia del tipo de suelo en el rango de períodos de retorno, esto si ocurre para los períodos de 1 y 2 segundos, donde los suelos tipo A y B tienen períodos de retorno dentro de los rangos de 200 a 480 años para el caso de Sa(1s) y de 150 a 420 años para el caso de Sa(2s). Para los suelos tipo C los períodos aumentan, y para los suelos tipo D se alcanzan los valores máximos superando los 1600 y 1500 años para los casos de Sa(1s) y Sa(2s) respectivamente.

En la Tabla 10 se adjuntan los períodos de retorno promedio clasificados por IM, tipo de suelo y zona sísmica.

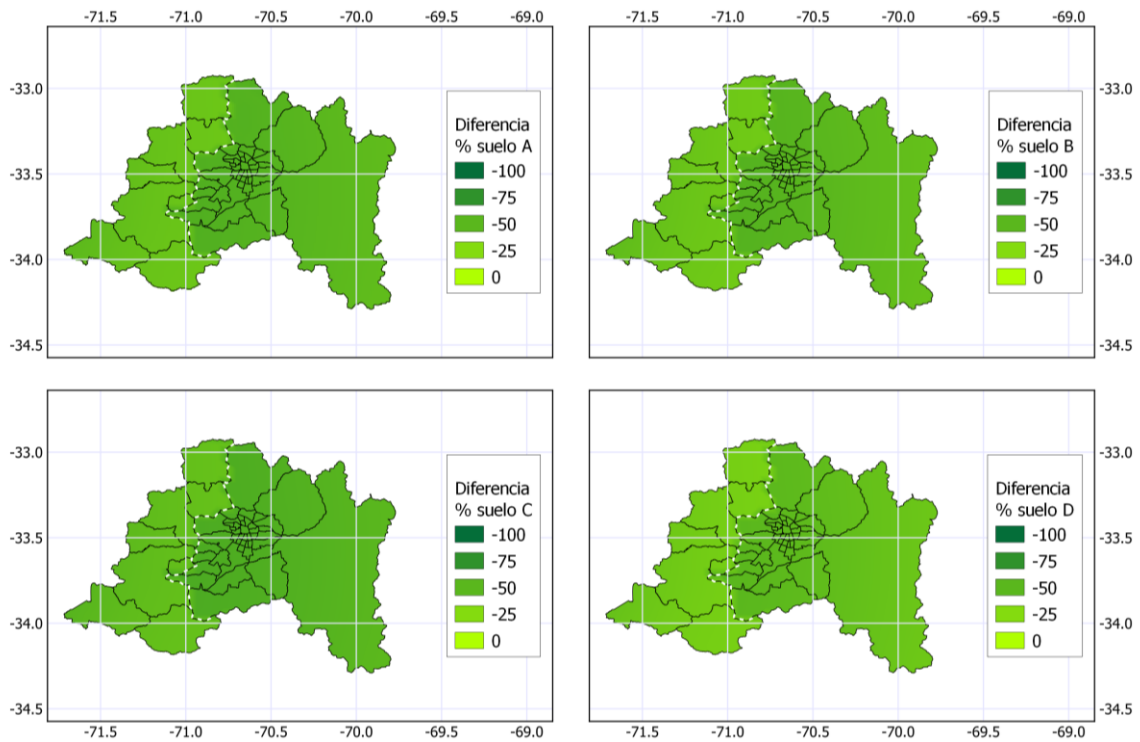
**Tabla 10: Períodos de retorno promedio para el caso particular de la Región Metropolitana**

<b>PERÍODO DE RETORNO PROMEDIO [AÑOS]</b>				
<b>IM</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Zona sísmica NCh433</b>		<b>Promedio</b>
		<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>PGA</b>	<b>A</b>	105	146	119
	<b>B</b>	114	159	129
	<b>C</b>	89	123	100
	<b>D</b>	126	175	142
<b>Sa(1s)</b>	<b>A</b>	242	301	262
	<b>B</b>	265	326	286
	<b>C</b>	480	578	514
	<b>D</b>	880	1230	1000
<b>Sa(2s)</b>	<b>A</b>	308	406	342
	<b>B</b>	192	245	210
	<b>C</b>	465	602	512
	<b>D</b>	905	1224	1014
<b>Sa(3s)</b>	<b>A</b>	453	611	507
	<b>B</b>	189	241	207
	<b>C</b>	511	664	564
	<b>D</b>	591	744	644

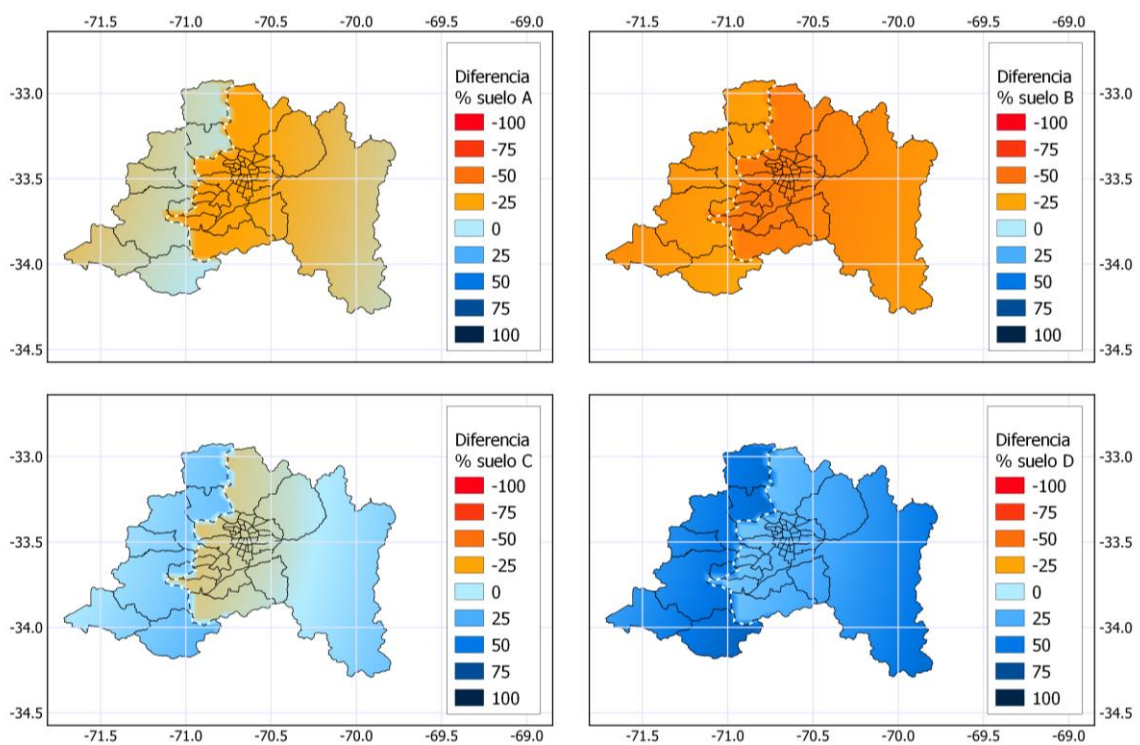
Al igual que en el caso anterior y como es posible apreciar en los mapas, se observa que los mayores valores de período de retorno se encuentran en la zona sísmica 3 para suelos tipo D y períodos de 1 y 2 segundos, superando los 1000 años.

#### **5.4 Diferencia porcentual de la aceleración espectral de diseño para la Región Metropolitana**

A continuación se presentan los mapas de diferencia porcentual de la aceleración espectral de diseño respecto a la correspondiente del UHS de 475 años.



**Figura 19: Diferencia porcentual de la aceleración espectral de diseño respecto al del UHS de 475 años para la IM de PGA en la Región Metropolitana**



**Figura 20: Diferencia porcentual de la aceleración espectral de diseño respecto al del UHS de 475 años para la IM de Sa(2s) en la Región Metropolitana**

Para el caso del PGA no es posible apreciar una influencia notoria del tipo de suelo, alcanzando las mayores diferencias en las comunas de Santiago donde fueron obtenidos anteriormente los períodos de retorno mínimos en un rango de 60 a 90 años. Para esta IM todas las diferencias porcentuales son negativas, lo que implica que la aceleración espectral de diseño es menor a la obtenida por el UHS de 475 años.

Por otro lado, para el caso del período de 2 segundos ocurre que para los suelos A y B las mayores diferencias porcentuales ocurren en la zona sísmica 2 (a la derecha de la línea segmentada), con máximos en las comunas de Santiago y de valores negativos al igual que en el caso anterior. Para el suelo tipo C las magnitudes disminuyen y se encuentran dentro del rango de -25 a 25% con un comportamiento más homogéneo a lo largo de la región. Y por último, en el suelo tipo D se observa que las mayores diferencias se encuentran en los sitios de la zona sísmica 3 donde fueron alcanzados los mayores períodos de retorno. Para este último tipo de suelo en todos los sitios de estudio se obtuvieron diferencias porcentuales positivas, es decir, aceleraciones espectrales por sobre las del UHS de 475 años, y con valores máximos que superan el 50%.

En la Tabla 11 se adjuntan las diferencias porcentuales promedios y máximas clasificadas por IM, tipo de suelo y zona sísmica.

**Tabla 11: Diferencias porcentuales promedio y máxima de la aceleración espectral de diseño respecto a la del UHS de 475 años para el caso de la Región Metropolitana**

DIFERENCIA PORCENTUAL DE ACELERACIÓN ESPECTRAL							
IM	Suelo	Zona sísmica NCh433				Total	
		2		3			
		% prom	% máx	% prom	% máx	% prom	% máx
PGA	A	-51	-56	-42	-49	-48	-56
	B	-49	-54	-39	-47	-45	-54
	C	-54	-59	-45	-52	-51	-59
	D	-45	-51	-35	-43	-41	-51
Sa(1s)	A	-30	-40	-21	-28	-27	-40
	B	-26	-38	-17	-26	-23	-38
	C	0	21	10	21	3	21
	D	30	55	46	59	35	59
Sa(2s)	A	-20	-30	-8	-16	-16	-30
	B	-39	-47	-29	-36	-35	-47
	C	-2	16	12	22	3	22
	D	32	56	49	63	38	63
Sa(3s)	A	-3	-15	12	21	2	21
	B	-39	-47	-30	-37	-36	-47
	C	3	21	17	28	8	28
	D	10	30	24	36	15	36

Al igual que en el caso general de Chile, al considerar los promedios de diferencias porcentuales negativos se tiene que los valores máximos ocurren para la IM de PGA, sin embargo, las diferencias porcentuales máximas absolutas se encuentran en los sitios de suelo tipo D para períodos de 1 y 2 segundos, las cuales en este caso rondan el 60% por sobre la aceleración espectral del UHS de 475 años.

## 6 Conclusiones

Como conclusión principal se puede asegurar que existe gran variabilidad en las magnitudes de períodos de retorno de los espectros de diseño debido a la influencia de la zona sísmica, tipo de suelo y el período de vibración que se esté analizando, razón por lo cual resulta imposible asignar un período de retorno único a cada espectro de diseño.

En ambos casos de estudio resulta que para la IM correspondiente al PGA no existe una gran influencia del tipo de suelo en las magnitudes de períodos de retorno, lo que implica que sus rangos de magnitudes sean constantes para los 4 tipos de suelos estudiados, y los sitios donde son alcanzados los valores máximos también se mantienen en las mismas ubicaciones independiente del tipo de suelo. Para el caso general de Chile los sitios que alcanzan los valores máximos están ubicados en la frontera de la Región de Antofagasta y la Región de Atacama con valores cercanos a los 200 años, en el límite cordillerano de la Región de Coquimbo con magnitudes que rondan los 240 años, y en sitios de la Región de la Araucanía y Región de Los Ríos con períodos de retorno que rondan los 275 años. Por otro lado, para el caso particular de la Región Metropolitana los sitios que alcanzan los valores máximos se encuentran en la zona sísmica 3 limitando con la zona 2 con magnitudes que rondan los 170 años, siguiendo con los sitios ubicados a cercanías de la cordillera en la zona sísmica 2 con valores hasta los 160 años.

Para las IMs asociadas a los períodos de 1 y 2 segundos se obtiene un claro aumento de los períodos de retorno a medida que disminuye la calidad del suelo. Para estos períodos se observa que los sitios que alcanzan los valores máximos están ubicados principalmente en la frontera de la Región de Antofagasta con la Región de Atacama para el caso general de Chile con magnitudes máximas cercanas a 3040 años para ambos períodos de 1 y 2 segundos, ambos correspondientes a un suelo tipo D. Y en el caso de la Región Metropolitana los sitios con valores máximos son los mismos ya mencionados anteriormente para el PGA alcanzando valores cercanos a 1680 y 1710 años para los períodos de 1 y 2 segundos respectivamente, ambos correspondientes al suelo tipo D.

Por último, para el período de 3 segundos los períodos de retorno resultan ser menores que para los de 1 y 2 segundos alcanzando valores máximos cerca de los 1930 y 910 años en el caso general de Chile y de la Región Metropolitana respectivamente. Sin embargo, se mantiene la ubicación de los sitios que alcanzan dichos valores máximos y el hecho de que estos tiendan a aumentar con la disminución de la calidad del suelo. No obstante, particularmente para este período ocurre una excepción con los suelos tipo B, donde son obtenidos los períodos de retorno mínimos.

En términos de los valores promedio para Chile adjuntados en la Tabla 8 se observa que los períodos de retorno máximos se ubican en la zona sísmica 3 y en los suelos tipo D con magnitudes máximas de 1452 y 1393 años para los períodos de 1 y 2 segundos respectivamente, siendo finalmente el promedio total máximo de Chile igual 1013 años para un suelo tipo D y la IM de Sa(1s). Por otro lado, los valores mínimos se obtienen para la IM del PGA variando desde los 89 a 124 años dependiendo del tipo de suelo.

Así mismo, para la Región Metropolitana los períodos de retorno máximos de la Tabla 10 se ubican en la misma zona sísmica y tipo de suelo ya mencionado con magnitudes de 1230 y 1224 años para los períodos de 1 y 2 segundos respectivamente, siendo finalmente el promedio total máximo de la región igual a 1014 años para un suelo tipo D y la IM de Sa(2s). Al igual que en el caso anterior, los valores mínimos se dan para la IM del PGA con valores desde los 100 a 142 años dependiendo del tipo de suelo.

Con todos los resultados obtenidos se concluye que los espectros de diseño no corresponden a espectros asociados a un período de retorno de 475 años. Y a partir de los cálculos realizados para establecer qué tan diferentes son los espectros de diseño con los UHS asociados al período de retorno ya mencionado, se obtiene que la diferencia de ambos es de igual forma dependiente de la zona sísmica, tipo de suelo y período de vibración.

Bajo esta idea se tiene que para el caso general de Chile la diferencia porcentual de la aceleración espectral de diseño respecto al UHS de 475 años al considerar como IM el PGA no tiene gran variación según el tipo de suelo, obteniendo para todos los casos que los sitios que presentan la mayor diferencia son los ubicados al norte de Chile en el sector cordillerano desde la Región de Arica y Parinacota hasta

la Región de Antofagasta (sitios de la zona sísmica 1) alcanzando una diferencia máxima de -81% en el suelo tipo C, donde el signo negativo indica que la aceleración espectral de diseño es menor que la del UHS de 475 años. Es importante destacar que para este caso todas las diferencias porcentuales son negativas.

Sin embargo, para períodos superiores como el de 2 segundos cuyos mapas de diferencia porcentual son los de la Figura 14, se observa que sí influye el tipo de suelo, teniendo la misma tendencia descrita anteriormente para los suelos A y B respecto a la ubicación de los sitios con las diferencias porcentuales máximas. El suelo tipo C que fue el que para el PGA alcanzó la diferencia porcentual máxima, en este caso presenta los valores mínimos, siendo el máximo de -50%, y considerando que tiene menor variabilidad de las diferencias porcentuales y con un comportamiento más homogéneo tanto para las diferencias positivas como negativas, se obtiene en promedio una diferencia de -2% respecto al UHS de 475 años. Por último, para el suelo tipo D se alcanza la diferencia porcentual máxima con un valor de 97% para sitios ubicados en la frontera de la Región de Antofagasta y la Región de Atacama, siendo este uno de los pocos casos donde la cantidad de sitios en que la aceleración espectral de diseño es sobrestimada respecto al UHS de 475 años es considerablemente mayor respecto a la cantidad de sitios en que es subestimada.

Así mismo, en el caso de la Región Metropolitana para el PGA se observa de acuerdo con los mapas de la Figura 19 que todas las diferencias porcentuales resultan ser negativas, y que las mayores diferencias ocurren en las comunas de Santiago con un valor máximo de -59% en el suelo tipo C a pesar de no haber gran variabilidad por tipo de suelo.

No así para el período de 2 segundos de acuerdo con los mapas de la Figura 20 donde en los suelos A y B se mantiene el hecho de que los sitios con mayor diferencia porcentual están ubicados en las comunas de Santiago con magnitudes de -30 y -47% respectivamente. Para el suelo tipo C se obtienen las diferencias mínimas siendo el máximo de un 22%, y su valor promedio uno de los mínimos con magnitud del 3%. Por último, para el suelo tipo D los sitios con las mayores diferencias se encuentran en la zona sísmica 3 alcanzando un máximo de 63%.

Como último comentario, es importante mencionar que al momento de diseñar estructuras en Chile es utilizado el método LRFD para la estimación de las solicitaciones de carga, en el cual es considerado un factor de 1,4 para las solicitaciones sísmicas, lo cual implica que en la práctica es considerado un 40% adicional de las solicitaciones. Si esto es aplicado a los resultados de esta investigación podrían ocurrir casos en que las diferencias porcentuales promedio disminuyan y, por lo tanto, que los espectros de diseño sean más cercanos al período de retorno de 475 años. Un ejemplo claro de esto es que de los resultados de la Tabla 9 correspondiente a las diferencias porcentuales del caso general de Chile, se obtuvo que para la IM del PGA las diferencias porcentuales promedio van desde -47 a -55%, y si es considerado un 40% adicional sería posible disminuir dichas diferencias a unas del orden del -10 al 10%. Lo mismo ocurre para el caso de la Región Metropolitana con la IM del PGA según la Tabla 11, en la cual las diferencias porcentuales van desde -41 a -51%.

Es importante tener en cuenta que la disminución de la diferencia porcentual es aplicable para los casos en que los resultados fueron de diferencias negativas. En los casos en que los resultados dieron magnitudes positivas las diferencias porcentuales se verían incrementadas. Debido a esto es posible concluir que para la IM correspondiente al PGA es posible disminuir la diferencia del espectro de diseño con el UHS de 475 años una vez sea considerada esta solicitud adicional, no así para los períodos de vibración superiores en donde el tipo de suelo pasa a ser un factor influyente al obtener diferencias porcentuales tanto positivas como negativas, por lo cual debería ser estudiado caso a caso.

## **7 Recomendaciones**

En el inicio de la investigación fueron considerados los UHS con períodos de retorno desde los 10 a 1000 años para la estimación de los períodos de retorno de los espectros de diseño, y luego de comprobar la existencia de valores superiores a ese rango fueron incorporados los períodos de 5000 y 10000 años para poder realizar la interpolación lineal que permite la estimación realizada en MATLAB.

Considerando lo anterior y que ya se tiene una estimación de las magnitudes de períodos de retorno máximos, es recomendable reestablecer el rango de probabilidades de excedencia considerados en el cálculo de los UHS obtenidos de OpenQuake de tal forma que la diferencia entre períodos de retorno consecutivos sea menor y que por lo tanto los resultados de la interpolación sean más confiables cuando se hable de períodos de retorno superiores a los 1000 años. Otra posibilidad es optar por alguna línea de tendencia o ajuste polinomial en la curva generada al graficar el espectro de aceleración de un período de vibración específico en función del período de retorno.

## **8 Agradecimientos**

En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de esta etapa universitaria, por el esfuerzo realizado en darme la educación con la que cuento, y por la formación que me dieron a lo largo de mi vida. Gracias por inculcarme lo que es la paciencia y la perseverancia, y por criarme como una persona que cuenta con la fortaleza de cumplir lo que se propone.

Gracias a mi hermano por el cariño y apoyo a lo largo de esta etapa, por motivarme a seguir adelante, por ser un modelo a seguir, y por celebrar mis logros como si fuesen los suyos.

Al resto de mi familia, tíos, primos y principalmente mis abuelos, para quienes va dedicado en gran parte este logro considerando que una de las cosas que siempre deseaban para sus nietos era que aprovecháramos la oportunidad de tener una buena educación, cosa de la cual fueron privados dadas las condiciones de la sociedad en esa época.

Gracias enormemente al profesor Pablo Heresi por toda la ayudada brindada a lo largo de esta investigación, por su muy buena disposición para aclarar, escuchar y explicar todas las dudas que fueron surgiendo. Y por todas las instancias de conversación en conjunto con el grupo de investigación que permitieron llevar a cabo este trabajo de la manera más amena posible.

A mis amigas del colegio, Paloma, Karla, Paula, Paulette, Rous y Gaby por su amistad a lo largo de todos estos años, por esas tardes de relajó que permitían desconectarse un poco del trabajo y estrés del día a día. Por la preocupación, atención y disposición a escuchar, motivar y ser un apoyo más en mi vida.

Por último, también agradecer a todos mis compañeros y grupos de amigos creados a lo largo de la carrera. A Pía, Simona, Tatiana y Alexandra, con quienes a pesar de seguir caminos distintos hemos incluso fortalecido la amistad con el pasar de los años. A Javier, Cristóbal, Diego y Claudio por integrarme y permitir recordar la etapa universitaria como una de las mejores. Y a Matías y Sebastián por su amistad y gran apoyo durante este último tiempo.

## 9 Referencias

- Algermissen, S. T., & Perkins, D. M. (1976). *A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States* (pp. 76-416). Reston, VA: US Geological Survey.
- Applied Technology Council, & Structural Engineers Association of California. (1978). *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings: A Cooperative Effort with the Design Professions, Building Code Interests, and the Research Community* (Vol. 3, No. 6). Department of Commerce, National Bureau of Standards.
- Baker, J. W. (2013). An introduction to probabilistic seismic hazard analysis. *White paper version*, 2(1), 79.
- Bommer, J. J., & Pinho, R. (2006). Adapting earthquake actions in Eurocode 8 for performance-based seismic design. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(1), 39-55.
- 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.
- Decreto Supremo N°61 de 2011 [Ministerio de Vivienda y Urbanismo]. Aprueba reglamento que fija el diseño sísmico de edificios y deroga D.S. N°117, (V. y U.), de 2010.
- 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.
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). *Diseño sísmico de edificios* (NCh433).
- Instituto Nacional de Normalización. (2003). *Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales* (NCh2369)
- Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., & de la Llera, J. C. (2019). An updated recurrence model for Chilean subduction seismicity and statistical validation of its Poisson nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), 66-74.
- 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.