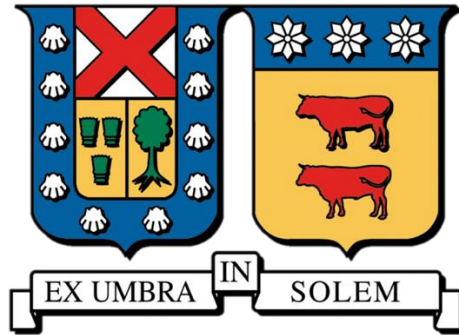


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO, CHILE



“Más allá de la Magnitud: Caracterización del Rol del Deslizamiento Cosmico en el Control de la Inundación de Localidades Costeras de Chile Central”

Memoria presentada por:

JOSÉ DOMINGO ROJAS BAEZA

Para optar al Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía:

Dr. Patricio Andrés Catalán Mondaca

Octubre, 2023

## Agradecimientos

*A mi familia y amigos por su apoyo constante y a mis compañeros(as) de carrera que prefirieron hacer un camino en conjunto y no de competencia.*

*A todo aquel que aportó un granito de arena para sumar motivación en esta etapa.*

*A las ganas de seguir aprendiendo y compartir el aprendizaje.*

Agradecer a mi profesor guía Patricio Catalán y a FONDECYT 1220648: “Unraveling the balance between earthquake source and bathymetry in controlling tsunami resonance along the Chilean coast”.

## Resumen

Este trabajo tiene como objetivo evaluar y caracterizar los terremotos que desencadenan las inundaciones más severas por tsunami en la localidad de Valparaíso-Viña del Mar, a través del análisis de patrones en la concentración de deslizamientos cosísmicos. Para esto, se cuenta con una base de datos con 2800 escenarios de terremotos previamente modelados en el software Tsunami HySEA. Cada escenario incluye una distribución de deslizamiento cosísmico y el área de inundación resultante en Valparaíso-Viña del Mar.

La metodología propuesta implica la evaluación de la exposición de la localidad a partir de una base de datos jerarquizada según el área de inundación generada por cada escenario. Luego, se agrupan los deslizamientos cosísmicos en subconjuntos que corresponden a intervalos de 1% de la base de datos. De cada subconjunto, se genera un escenario representativo promedio, y se analiza su comportamiento e inundación asociada.

Los resultados destacan que las inundaciones más graves por tsunami en Valparaíso-Viña del Mar provienen de escenarios con concentraciones de deslizamientos frente a las costas de la V Región, en la zona menos profunda de la interacción interplaca. Además, se observa una diferencia en la vulnerabilidad ante tsunamis entre Valparaíso y Viña del Mar, siendo esta última más afectada, con aproximadamente un 30% de los escenarios generando inundaciones significativas, en comparación con un 20% en Valparaíso.

También se resalta que no solo los escenarios con magnitudes de terremoto mayores provocan las peores inundaciones. En menor proporción, se encuentran escenarios con magnitudes inferiores que generan inundaciones similares, gracias a la concentración estratégica de deslizamientos.

A pesar de ciertas limitaciones, es posible realizar una aproximación al tsunami de 1730 en Valparaíso. Aproximadamente un 3% de los escenarios logra igualar o superar esta inundación histórica, incluso con magnitudes de terremoto menores a las estimadas por Carvajal et al. (2017b). Esta información sirve para resaltar la importancia de la ubicación de la ruptura y distribución de los deslizamientos asociados en la generación de inundaciones similares.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Estado del arte</b> .....	<b>2</b>
2.1	Ciclo sísmico e investigaciones asociadas .....	2
2.1.1	Periodo intersísmico .....	2
2.1.2	Periodo cosísmico.....	5
2.1.2.1	Deslizamientos cosísmicos de sismos en Chile.....	7
2.2	Contexto sísmico en Chile Metropolitano y brecha tsunamigénica pendiente.....	9
2.2.1	Terremoto de Valparaíso 1730 .....	11
<b>3</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>13</b>
3.1	Objetivo general .....	13
3.2	Objetivo específico .....	13
<b>4</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>14</b>
4.1	Descripción de la base de datos .....	14
4.2	Jerarquización de la base de datos .....	16
4.3	Criterios aplicados para el análisis de los deslizamientos cosísmicos.....	17
4.4	Magnitudes que predominan en eventos tsunamigénicos para la localidad .....	18
<b>5</b>	<b>Resultados y Análisis</b> .....	<b>19</b>
5.1	Valparaíso - Viña del Mar y sublocalidades de interés .....	19
5.1.1	Determinación del porcentaje de escenarios significativos para el análisis .....	20
5.1.2	Análisis de los deslizamientos cosísmicos .....	25
5.1.2.1	Deslizamientos máximos representativos del intervalo 0-10% .....	30
5.1.2.2	Deslizamientos máximos representativos del intervalo 10-20% .....	33

5.1.2.3	Deslizamientos máximos representativos del intervalo 20-30% .....	39
5.1.3	Magnitudes que predominan en eventos tsunamigénicos para Valparaíso-Viña del Mar.....	45
5.2	Escenarios que se aproximan al tsunami de 1730 .....	48
5.2.1	Determinación del porcentaje de escenarios significativos para el análisis .....	48
5.2.2	Análisis de los deslizamientos cosísmicos .....	51
5.2.3	Magnitudes que predominan en eventos que inundan Valparaíso como 1730.....	57
<b>6</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>63</b>

## Índice de figuras

Figura 2.1 Esquema periodo Intersísmico. (Fuente: Bernardin (2019)).....	2
Figura 2.2 Campo combinado de velocidades horizontales a partir de mediciones GPS continuas y de campaña. Fuente: Métois et al. (2016) .....	3
Figura 2.3 Distribución de acoplamiento (18°-38°S), área de ruptura de sismos: Maule 2010, Iquique 2014 e Illapel 2015 (elipses verdes) y en gris las zonas de acoplamiento bajo, LCZ. Fuente: Métois et al. (2016).....	5
Figura 2.4 Esquema periodo Inter-sísmico. Fuente: Bernardin (2019) .....	6
Figura 2.5 Estructura de la corteza señalando los dominios de profundidad A-B-C descritos por Lay et al. (2012). Fuente: Melnick (2016) .....	7
Figura 2.6 Marco sismotectónico de la zona de subducción chilena y longitud de las rupturas sísmicas (líneas verticales). Fuente: Molina et al. (2021) .....	8
Figura 2.7 Contexto sismotectónico de la interfase de subducción de Chile Central. Fuente: Carvajal et al. (2017b) .....	10
Figura 2.8 Alturas y extensión de las inundaciones del tsunami de 1730 inferidas de documentos históricos. Fuente: Carvajal et al. (2017b) .....	11
Figura 4.1 Dominio donde se desarrollan los deslizamientos cosísmicos (Rectángulo naranja). Fuente: Elaboración propia. ....	15
Figura 4.2 Zona donde se evalúan las inundaciones para Valparaíso- Viña del Mar (rectángulo verde). Fuente: Elaboración propia. ....	15
Figura 4.3 (Izquierda) Base de datos original de escenarios compuesta por la inundación por tsunami y la distribución de deslizamientos asociados; (Derecha) Base de datos jerarquizada según el área inundada por tsunami. Fuente: Elaboración propia. ....	16
Figura 4.4 Porcentaje de área inundada por tsunami versus el porcentaje de escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	17
Figura 4.5 Esquema de la obtención de escenarios representativos de cada subconjunto. Fuente: Elaboración propia.....	18
Figura 5.1 Límites para la localidad Valparaíso-Viña del Mar (rectángulo verde) y las sublocalidades Valparaíso y Viña del Mar (rectángulo rojo y azul, respectivamente). Fuente: Elaboración propia.....	19

Figura 5.2 Porcentaje de área inundada por tsunami versus el porcentaje de escenarios para Valparaíso-Viña del Mar y sus sublocalidades. Fuente: Elaboración propia. ....	20
Figura 5.3 Área inundada por tsunami en hectáreas versus el porcentaje de escenarios para Valparaíso-Viña del Mar y sus sublocalidades. Fuente: Elaboración propia. ....	21
Figura 5.4 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar, considerando los datos entre un 0 y 10%. Fuente: Elaboración propia. ....	23
Figura 5.5 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar, considerando los datos entre un 10 y 20%. Fuente: Elaboración propia. ....	24
Figura 5.6 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar, considerando los datos entre un 20 y 30%. Fuente: Elaboración propia. ....	24
Figura 5.7 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar, considerando los datos entre un 30 y 40%. Fuente: Elaboración propia. ....	25
Figura 5.8 Deslizamiento cosísmico representativo para los intervalos entre 0-1% (izquierda) y 1-2% (derecha). Fuente: Elaboración propia. ....	26
Figura 5.9 Deslizamiento cosísmico representativo para los intervalos entre 2-3% (izquierda) y 3-4% (derecha). Fuente: Elaboración propia. ....	27
Figura 5.10 Deslizamiento cosísmico representativo para los intervalos entre 4-5% (izquierda) y 5-6% (derecha). Fuente: Elaboración propia. ....	27
Figura 5.11 Deslizamiento cosísmico representativo para los intervalos entre 6-7% (izquierda) y 7-8% (derecha). Fuente: Elaboración propia. ....	28
Figura 5.12 Deslizamiento cosísmico representativo para los intervalos entre 8-9% (izquierda) y 9-10% (derecha). Fuente: Elaboración propia. ....	28
Figura 5.13 Distribución de deslizamientos máximos representativos. (Izquierda) Todos los tramos en base a escala de colores; (Derecha) Destaca los tramos respectivos al 30%. Fuente: Elaboración propia. ....	29
Figura 5.14 Distribución de deslizamientos máximos representativos, resaltando intervalo entre 0 y 10%. Fuente: Elaboración propia. ....	30
Figura 5.15 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 7-8%. Fuente: Elaboración propia. ....	32
Figura 5.16 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 7-8%. Fuente: Elaboración propia. ....	32

Figura 5.17 Distribución de deslizamientos máximos representativos, resaltando intervalo entre 10 y 20%. Fuente: Elaboración propia. ....	33
Figura 5.18 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 14-15%. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 5.19 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 14-15%. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 5.20 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 15-16%. Fuente: Elaboración propia.....	36
Figura 5.21 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 15-16%. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 5.22 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 19-20%. Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 5.23 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 19-20%. Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 5.24 Distribución de deslizamientos máximos representativos, resaltando intervalo entre 20 y 30%. Fuente: Elaboración propia. ....	39
Figura 5.25 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 22-23%. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 5.26 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 22-23%. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 5.27 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 24-25%. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 5.28 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 24-25%. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 5.29 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 25-26%. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 5.30 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 25-26%. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 5.31 Porcentaje de participación de cada magnitud en intervalos de 10%. Fuente: Elaboración propia.....	45

Figura 5.32 Porcentaje de participación de cada magnitud en intervalos de 1%. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 5.33 Escenarios de magnitud Mw 8.6 de intervalo 0-10%. (a) intervalo 2-3%; (b) intervalo 3-4%; (c-f) intervalo 4-5%; (g) intervalo 5-6%; (h-j) intervalo 8-9%. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 5.34 Ubicación de sitios históricos: Iglesia La Matriz, Convento San Agustín e Iglesia De La Merced. Fuente: Elaboración propia. ....	48
Figura 5.35 Porcentaje de área inundada por tsunami versus el porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso como 1730 (naranja). Fuente: Elaboración propia. ....	49
Figura 5.36 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso como en 1730. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 5.37 Alturas máximas de olas resultantes en Valparaíso. Basada en condiciones iniciales de Carvajal et al. (2017b)). Fuente: Zamora et al. (2020).....	50
Figura 5.38 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar como en 1730.....	51
Figura 5.39 Distribución de deslizamientos máximos representativos del 3% que inunda Valparaíso como en 1730. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 5.40 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 0-1%. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 5.41 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar como en 1730. Intervalo 0-1%. Fuente: Elaboración propia. ....	54
Figura 5.42 Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 1-2%. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 5.43 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar como en 1730. Intervalo 1-2%. Fuente: Elaboración propia. ....	55
Figura 5.44 Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 2-3%. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 5.45 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar como en 1730. Intervalo 2-3%. Fuente: Elaboración propia. ....	57
Figura 5.46 Porcentaje de participación de cada magnitud en intervalos de 1%. Fuente: Elaboración propia.....	58

Figura 5.47 Escenarios de magnitud menor a Mw 9.0. (a) intervalo 0-1%; (b-f) intervalo 1-2%. Fuente: Elaboración propia. .... 59

Figura 5.48 Escenarios de magnitud menor a Mw 9.0. (a-f) intervalo 2-3%. Fuente: Elaboración propia..... 60

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Deslizamientos Cosísmicos Máximos en Sismos Destacados del Siglo XX y XXI. Fuente: Elaboración propia.....	9
Tabla 5.1 Resumen de lo expuesto en las Figura 5.2 y Figura 5.3. Fuente: Elaboración propia. .....	22
Tabla 5.2 Resumen de deslizamientos representativos para intervalo entre 0-10%. Fuente: Elaboración propia.....	31
Tabla 5.3 Resumen de deslizamientos representativos para intervalo entre 10-20%. Fuente: Elaboración propia.....	34
Tabla 5.4 Resumen de deslizamientos representativos para intervalo entre 20-30%. Fuente: Elaboración propia.....	40
Tabla 5.5 Resumen de deslizamientos representativos para intervalos que inundan Valparaíso como en 1730. Fuente: Elaboración propia. ....	52

# 1 Introducción

Dentro de los fenómenos naturales, los tsunamis son uno de los que tienen mayor potencial de impacto en asentamientos costeros alrededor del mundo, por lo que caracterizar su amenaza es una tarea muy importante. Hasta el momento, el enfoque utilizado en diferentes estudios (Sepúlveda *et al.* (2018), Zamora *et al.* (2021)) ha sido desde la perspectiva de la fuente, es decir, a partir del escenario particular de un terremoto de subducción y cómo este afecta a una o más localidades costeras. Este enfoque va de la mano con la utilización de modelos predictivos, asociando históricamente el peor escenario a aquel originado por el terremoto de mayor magnitud (Sepúlveda *et al.* (2017)). Sin embargo, el uso de modelos estocásticos y la creciente capacidad computacional han permitido modelar una gran cantidad de escenarios para ciertas localidades, observándose que no siempre los eventos de mayor magnitud generan la mayor inundación (Zamora *et al.* (2021)). Esto sugiere que otras características del terremoto fuente son relevantes en el proceso de inundación por tsunami, más allá de la magnitud. En consecuencia, cobra relevancia el estudio de las características de un terremoto y el lugar dónde ocurre, además de la magnitud de este.

La presente investigación plantea analizar la susceptibilidad de la localidad costera más poblada de Chile a ser inundadas ante un tsunami, Valparaíso y Viña del Mar, evaluando los factores que caracterizan a un evento sísmico tsunamigénico y cómo estos determinan el nivel de la amenaza de los sitios estudiados. En particular, se plantea la hipótesis que la capacidad de inundar una localidad por parte del tsunami depende de la concentración y ubicación de las zonas de deslizamiento cosísmico. Es decir, que una ruptura cuya distribución de deslizamiento se posicione estratégicamente permitiría generar un gran tsunami, a pesar de que el sismo no sea el de mayor magnitud dentro del rango en estudio.

Para responder esto, se cuenta con una base de datos de inundación, compuesta por valores de profundidad máxima de flujo y deslizamiento cosísmico obtenidas a través de la modelación en el software Tsunami HySEA para un gran número de escenarios generados estocásticamente. A partir de estos datos, y mediante un análisis estadístico que jerarquice y caracterice los escenarios fuente dependiendo de su efecto en variables relevantes tales como el tamaño del área inundada, se busca identificar características y patrones entre los eventos que generan las mayores inundaciones. Esta memoria es parte del proyecto FONDECYT No 1220648.

## 2 Estado del arte

### 2.1 Ciclo sísmico e investigaciones asociadas

La costa de Chile se encuentra en proximidad de la fosa Perú-Chile, donde la placa de Nazca subduce bajo la placa Sudamericana. Esta interacción de placas sitúa a Chile en una zona altamente sísmica, con un constante riesgo de tsunamis en sus costas. A nivel general, los movimientos tectónicos siguen un patrón cíclico que se divide en tres periodos: intersísmico, cosísmico y postsísmico, siendo los dos primeros períodos de particular relevancia para los propósitos de este estudio.

#### 2.1.1 Periodo intersísmico

Durante el intervalo entre terremotos, conocido como periodo intersísmico, ocurre una acumulación constante de deformación en la zona de subducción. Aquí, la placa oceánica permanece unida a la placa continental, sin experimentar deslizamiento libre. A lo largo de este periodo, la corteza continental experimenta compresión y deformación, lo que resulta en un aumento de la elevación, como se muestra en la Figura 2.1. Esta transformación puede ser identificada a través de sistemas de posicionamiento global (GPS) (p.ej., Moreno *et al.* (2012); Métois *et al.* (2016); Li *et al.* (2015)). La velocidad de desplazamiento varía según la ubicación, siendo más alta en las estaciones costeras y más baja en las de la cordillera, donde la deformación es menor.

El proceso de acumulación de energía durante este periodo es complejo y no sigue un patrón periódico, pero presenta una naturaleza repetitiva. En el caso de los megaterremotos, caracterizados por su gran magnitud, este proceso de acumulación de deformación puede abarcar siglos antes de que finalmente se libere la energía en un evento sísmico de gran magnitud.

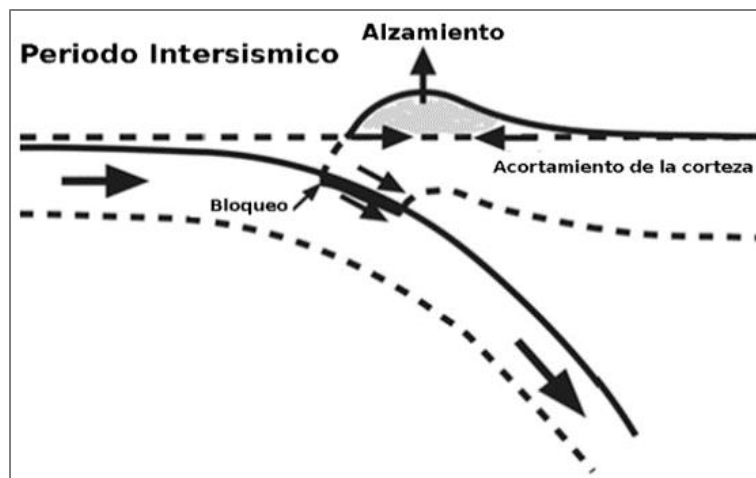


Figura 2.1 Esquema periodo Intersísmico.  
(Fuente: Bernardin (2019))

Recientemente, la expansión de redes GPS densas en los límites de las placas ha permitido un mapeo altamente preciso del acoplamiento intersísmico en fallas activas. En particular, en la región chilena entre las latitudes 18° y 38°S, Métois *et al.* (2016) combinó datos recientes de GPS con información más antigua para ofrecer una imagen casi continua de las variaciones en el acoplamiento intersísmico en la interfaz de subducción.

La convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana ocurre a una velocidad aproximada de 68 mm/año, con velocidades principalmente paralelas a la convergencia de placas en el campo cercano. Sin embargo, estas velocidades disminuyen y se rotan hacia una dirección más perpendicular a la trinchera, llegando a cero al interior del continente Sudamericano, como se ilustra en la Figura 2.2.

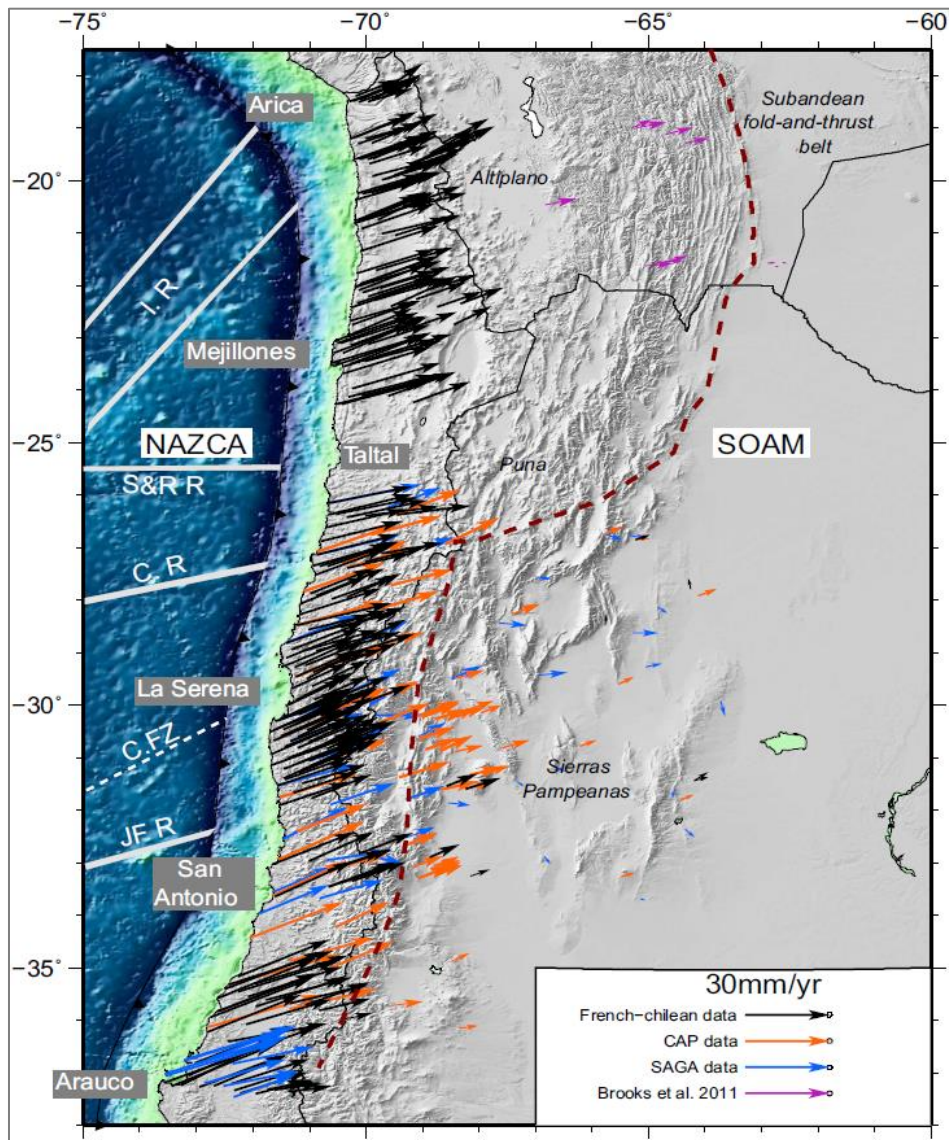


Figura 2.2 Campo combinado de velocidades horizontales a partir de mediciones GPS continuas y de campaña.

Fuente: Métois *et al.* (2016)

Mediante la distribución de acoplamiento obtenida por Métois *et al.* (2016)(ver Figura 2.3), se establece que el coeficiente de acoplamiento intersísmico está relacionado con la proporción entre la velocidad de deslizamiento en la falla durante el periodo intersísmico y la velocidad de las placas a largo plazo. Un coeficiente de acoplamiento del 0% indica una interfaz que se mueve libremente y se adapta a la convergencia contemporánea a través del deslizamiento sísmico (ya sea constante o en pulsos). Por otro lado, un coeficiente del 100% señala una interfaz bloqueada que no permite movimiento alguno durante el periodo intersísmico, lo que da lugar a la acumulación de deformación elástica en la litosfera circundante. Valores intermedios del coeficiente de acoplamiento indican zonas más complejas que acomodan la convergencia tanto mediante ruptura sísmica como a través de fluencia, o que muestran heterogeneidad espacial con áreas bloqueadas y áreas en fluencia (Métois *et al.* (2012)).

A la izquierda de la Figura 2.3, se destacan al menos seis zonas de bajo acoplamiento (LCZ por sus siglas en inglés), en comparación con los segmentos vecinos altamente acoplados. Las zonas de bajo acoplamiento parecen comportarse como barreras a la propagación de rupturas de la megafalla, mientras que los segmentos altamente acoplados se correlacionan fuertemente con las áreas de ruptura de megasismos recientes (Métois *et al.* (2016)). Por otro lado, las áreas en verde corresponden a zonas de ruptura para tres de los principales terremotos de los últimos 20 años: el terremoto Maule Mw 8.8 en 2010 (Vigny *et al.* (2011); Moreno *et al.* (2012)), el terremoto Iquique Mw 8.1 en 2014 (Shurr *et al.* (2014)) y el terremoto Illapel Mw 8.4 en 2015 (Ruiz *et al.* (2016)). Estos eventos han dejado tres brechas sísmicas aparentes: (i) en la región Metropolitana, frente a la costa de Valparaíso (entre 32°S y 34°S, con rupturas previas en 1906 y 1985); (ii) en el norte de Chile (entre 20.5°S y 23°S, sin ruptura desde 1877); (iii) en la región de Atacama (entre 30°S y 25°S) (Klein *et al.* (2018)). Esto permite una comparación detallada entre el acoplamiento intersísmico y las distribuciones de deslizamiento cosísmico, demostrando la correlación de primer orden entre los segmentos altamente acoplados y la ruptura de la megafalla. En particular, se confirma que todas estas rupturas de megaterremotos se detuvieron al ingresar en una LCZ (Métois *et al.* (2016)).

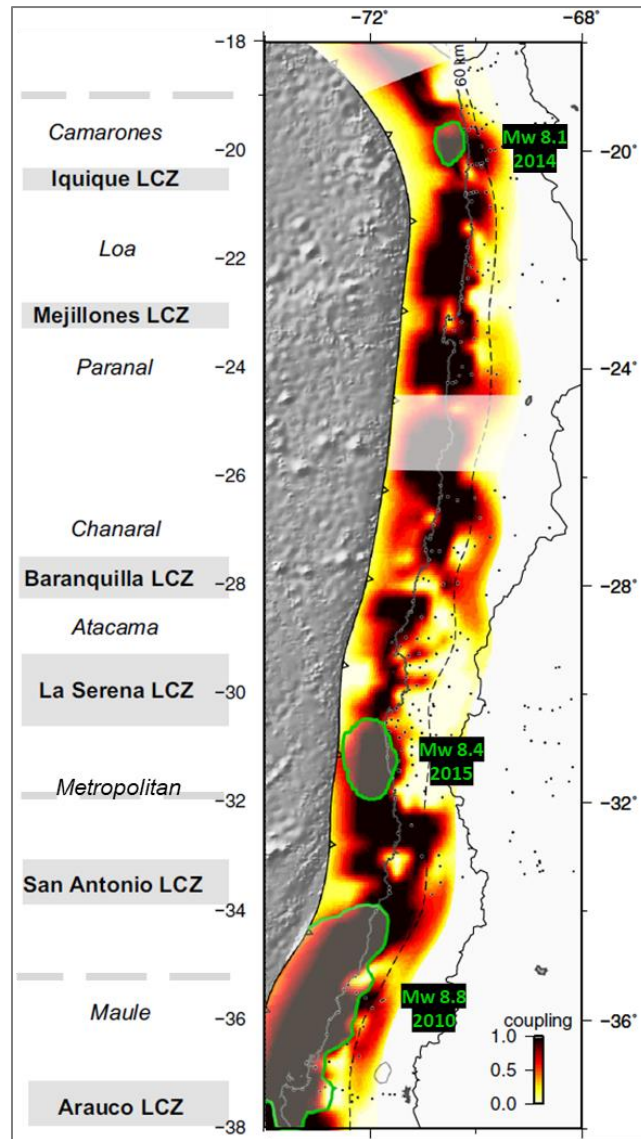


Figura 2.3 Distribución de acoplamiento ( $18^{\circ}$ - $38^{\circ}$ S), área de ruptura de sismos: Maule 2010, Iquique 2014 e Illapel 2015 (elipses verdes) y en gris las zonas de acoplamiento bajo, LCZ. Fuente: Métois et al. (2016)

### 2.1.2 Período cosísmico

Durante este período, especialmente en la zona de contacto, se produce una dislocación en la cual se libera una considerable cantidad de energía en un corto lapso, que varía desde segundos hasta minutos. Debido a esta dislocación que ocurre en profundidad, el campo de desplazamiento superficial cambia su dirección de movimiento, que previamente tenía durante el período intersísmico. Como resultado, tanto el movimiento de la superficie continental como el del fondo marino se orientan hacia la fosa (ver Figura 2.4). Durante este período, también se observan los fenómenos de subsidencia y alzamiento. Tanto la subsidencia como el alzamiento son consecuencias de la liberación repentina de energía y se manifiestan como un hundimiento y elevación de la superficie a lo largo de la falla.

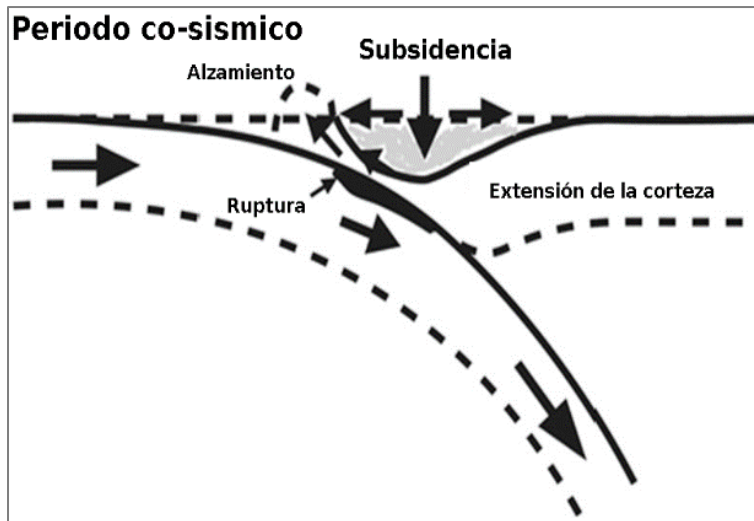


Figura 2.4 Esquema periodo Inter-sísmico.  
Fuente: Bernardin (2019)

La profundidad en la que ocurre la falla sísmica es un parámetro crucial para determinar si el deslizamiento cosísmico asociado puede desencadenar un tsunami. Específicamente, los tsunamis se generan a partir del alzamiento de la superficie cuando este ocurre bajo el lecho marino. Por lo tanto, si la dislocación ocurre en la parte más superficial de la placa, es probable que el tamaño de la ola sea mayor que si la ruptura tuviera lugar en una profundidad más considerable.

Para representar el deslizamiento y otras características sísmicas, Lay *et al.* (2012) describen tres dominios de falla distintos según la profundidad a lo largo de la megafalla (A, B y C), desde la fosa Perú-Chile hacia el continente en la zona sismogénica (ver Figura 2.5). El dominio A abarca desde la fosa hasta aproximadamente 15 km de profundidad en la interacción entre las placas. El dominio B se extiende desde 15 hasta aproximadamente 35 km de profundidad, mientras que el dominio C abarca desde unos 35 hasta 55 km de profundidad. En función de estos dominios y la profundidad que abarca la falla, los efectos pueden variar. En el dominio A, no se produce un cambio costero significativo, pero sí se puede generar un gran tsunami. En el dominio B, se observa un hundimiento costero y un tsunami considerable, mientras que en el dominio C se presenta un alzamiento costero y un tsunami de menor magnitud. Melnick (2016) sugiere que la línea de costa marca la transición entre el dominio de la falla más somero y el dominio más profundo.

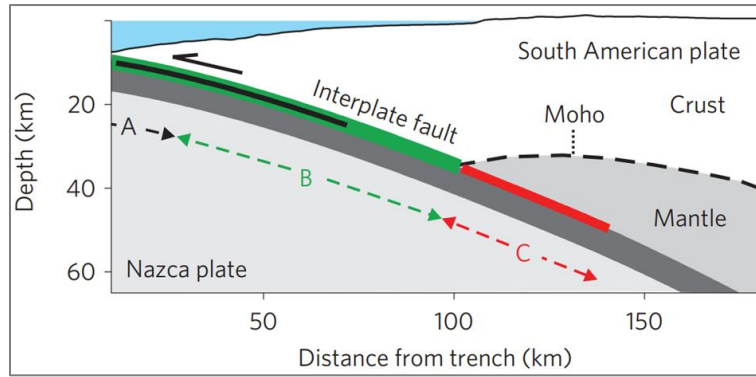


Figura 2.5 Estructura de la corteza señalando los dominios de profundidad A-B-C descritos por Lay et al. (2012).  
Fuente: Melnick (2016)

### 2.1.2.1 Deslizamientos cosísmicos de sismos en Chile

Chile, a lo largo de su historia, ha sido un territorio marcado por eventos sísmicos que han dejado una huella profunda en su geografía y en la comprensión de la actividad sísmica en la región. Durante los últimos cinco siglos, el margen chileno ha sido testigo de una frecuencia destacada de megaterremotos, abarcando desde eventos considerables hasta gigantescos con magnitudes de momento ( $M_w$ ) entre 8 y 9.5.

La Figura 2.6 nos proporciona una representación visual de la distribución de los deslizamientos cosísmicos vinculados a los sismos más significativos registrados durante los siglos XX y XXI. Entre estos eventos notables se incluyen el megaterremoto  $M_w$  9.5 de Valdivia en 1960 (Moreno *et al.* (2009)), el  $M_w$  8.8 de Maule en 2010 (Moreno *et al.* (2012)), el  $M_w$  8.4 de Illapel en 2015 (Tilmann *et al.* (2016)), el  $M_w$  8.1 de Iquique en 2014 (Shurr *et al.* (2014)), el  $M_w$  8 de Antofagasta en 1995 (Ruegg *et al.* (1996)), el  $M_w$  8 de Valparaíso en 1985 (Bravo *et al.* (2019)) y el  $M_w$  7.7 de Tocopilla en 2007 (Shurr *et al.* (2012)). La magnitud máxima de los deslizamientos cosísmicos asociados a estos y otros sismos se resume en la Tabla 2.1.

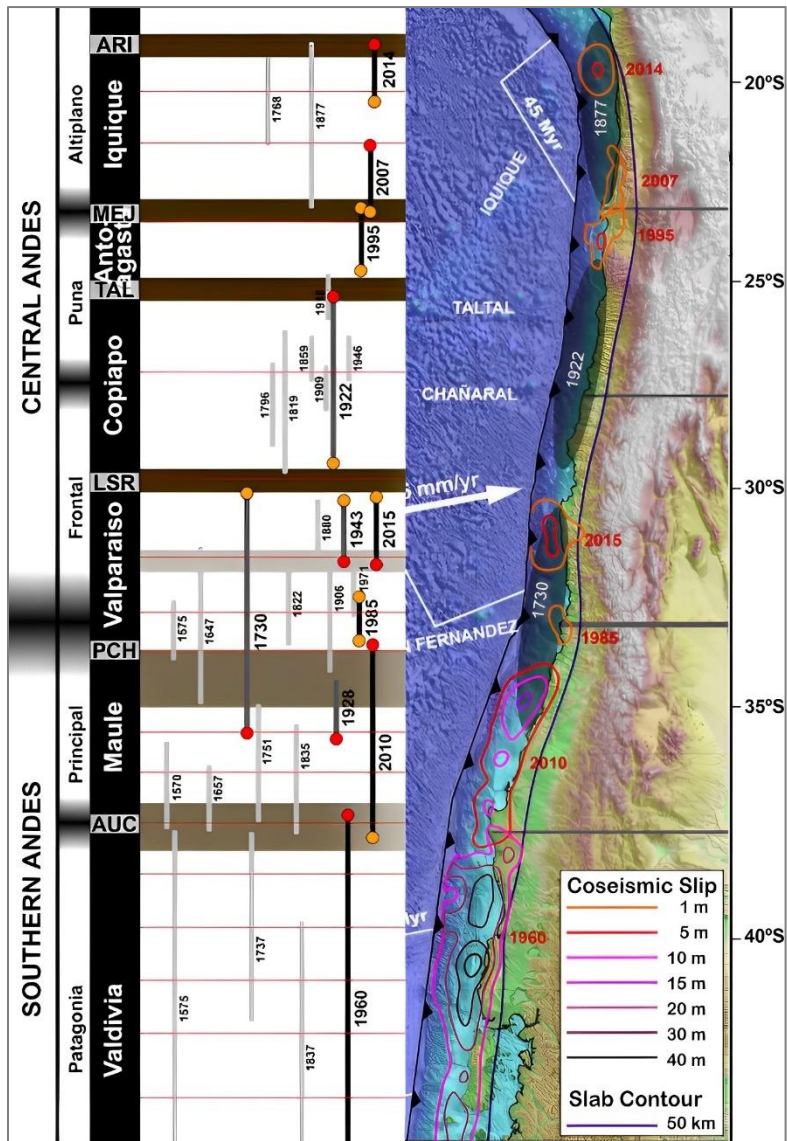


Figura 2.6 Marco sismotectónico de la zona de subducción chilena y longitud de las rupturas sísmicas (líneas verticales).  
Fuente: Molina et al. (2021)

Tabla 2.1 Deslizamientos Cosísmicos Máximos en Sismos Destacados del Siglo XX y XXI.  
Fuente: Elaboración propia.

Localidad	Año	Magnitud (Mw)	Deslizamiento cosísmico máximo (m)	Referencia
Valdivia	1960	9.5	41.0	Moreno <i>et al.</i> (2009)
Maule	2010	8.8	16.9	Moreno <i>et al.</i> (2012)
Illapel	2015	8.4	6.0	Tilmann <i>et al.</i> (2016)
Perú Sur (Arequipa)	2001	8.4	5.9	Ruegg <i>et al.</i> (2001)
Antofagasta	1995	8.0	5.0	Ruegg <i>et al.</i> (1996)
Iquique	2014	8.1	4.4	Shurr <i>et al.</i> (2014)
Valparaíso	1985	8.0	4.0	Bravo <i>et al.</i> (2019)
Tocopilla	2007	7.7	2.6	Shurr <i>et al.</i> (2012)

Los deslizamientos cosísmicos exhiben patrones distintivos según la naturaleza de los eventos sísmicos. En sismos no tsunamigénicos, como los de 1985, 1995 y 2007, los deslizamientos de tamaño moderado a grande afectaron principalmente la porción más profunda de la zona sismogénica, denominada zona C del megacorrimento (Lay *et al.* (2012)). En contraste, los megaterremotos tsunamigénicos, como los de 1960, 2010, 2014 y 2015, concentraron la mayoría de su deslizamiento bajo la punta del antearco en alta mar, impactando principalmente las zonas B y A según la definición de Lay *et al.* (2012).

Esta variación en la distribución de los deslizamientos cosísmicos es crucial para la comprensión de los eventos sísmicos y su influencia en la geografía chilena. Además, la Figura 2.6 también señala que una parte sustancial del mega cabalgamiento en el sur de los Andes se ha fracturado debido a los sismos de 1960 y 2010, mientras que persisten brechas sísmicas significativas en la región de los Andes centrales, especialmente ligadas a los terremotos históricos de Iquique en 1877 (Vigny *et al.* (2022)), Copiapó en 1922 (Carvajal *et al.* (2017a)) y Valparaíso en 1730 (Carvajal *et al.* (2017b)).

## 2.2 Contexto sísmico en Chile Metropolitano y brecha tsunamigénica pendiente

Se define como Chile Metropolitano a la porción central de Chile, ubicada aproximadamente entre 30°S y 37°S, donde reside más del 70% de la población del país. En esta franja geográfica, se identifica la existencia de una brecha sísmica en Valparaíso que aún no ha experimentado actividad sísmica. Dicha brecha está delimitada en el norte por el reciente terremoto de Illapel en 2015 (Ruiz *et al.*, 2016; Tilmann *et al.* (2016)), y en el sur por el terremoto del Maule en 2010, ambos de naturaleza tsunamigénica. Este último evento cerró una brecha sísmica madura que había acumulado tensión desde el sismo de 1835 (Moreno *et al.* (2012)).

En particular en Valparaíso, los terremotos significativos más recientes (1822, 1906 y 1985) presentan un intervalo de aproximadamente 80 años entre sus ocurrencias (Lomnitz *et al.* (2004); Dura *et al.* (2015)). Sin embargo, no se ha caracterizado que estos eventos generen tsunamis perceptibles para la población o causen daños de mayor consideración. Los efectos producidos por los terremotos de 1822 (Lomnitz *et al.* (2004)) y 1906 (Carvajal *et al.* (2017a)) sugieren rupturas de mayor profundidad que el promedio, mientras que los resultados del terremoto de 1985 (Bravo *et al.* (2019)) indican una liberación parcial del deslizamiento acumulado a poca profundidad desde 1730.

La Figura 2.7 ilustra la brecha sísmica situada entre las latitudes 32°S y 34°S, que se generó entre los sismos de Maule 2010 e Illapel 2015. El último de estos sismos liberó únicamente el segmento norte de la zona asociada a Valparaíso. Esta ruptura se extiende desde la región de bajo acoplamiento de La Serena hasta la latitud 32°S (ver Figura 2.3 y/o Figura 2.6). Cabe destacar que esta latitud no ha sido atravesada por un sismo de gran magnitud en los años 1880, 1943 y 2015 hacia el sur, ni en 1822 y 1906 hacia el norte (Tilmann *et al.* (2016); Molina *et al.* (2021)). El único sismo que ha roto la parte superior de la interfaz de subducción en esta área fue el terremoto de 1730, de acuerdo a lo estimado por Cavajal *et al.* (2017b).

Además, en la Figura 2.7 se presenta en color rojo el contorno que delimita el 80% del acoplamiento interplaca en la región (Metois *et al.* (2016)), junto con las isolíneas que representan la profundidad de la losa.

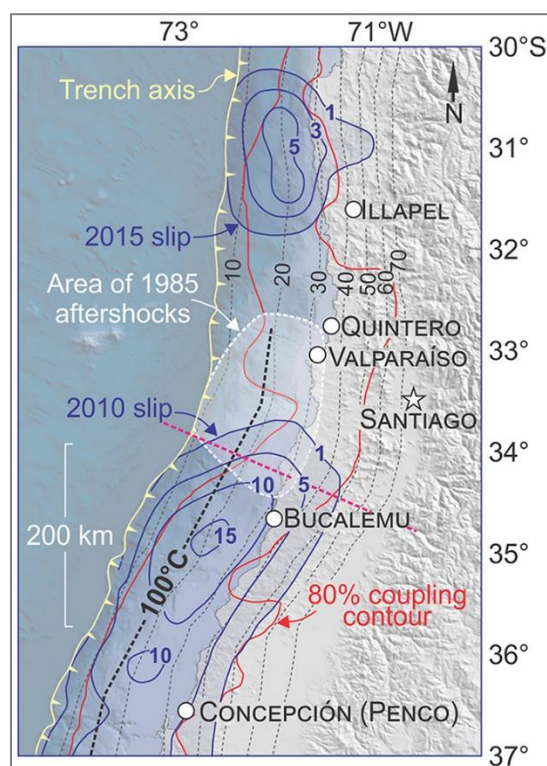


Figura 2.7 Contexto sismotectónico de la interfase de subducción de Chile Central.  
Fuente: Carvajal *et al.* (2017b)

Se estima que la recurrencia de un evento como el terremoto y tsunami de 1730 oscila entre aproximadamente 200 y 600 años (Dura *et al.* (2015)). Durante los últimos 293 años, no se ha registrado un terremoto de gran magnitud en esta región delimitada por los sismos de Maule 2010 e Illapel 2015. Estos elementos, sumados a la velocidad de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamérica, llevan a concluir que existe un potencial sísmico considerable para generar un terremoto de magnitud Mw 8.8 acompañado de un tsunami devastador en la zona central de Chile (Bravo *et al.* (2019)).

## 2.2.1 Terremoto de Valparaíso 1730

Los registros históricos arrojan luz sobre un terremoto de 1730 que tuvo impacto en la región de Chile Metropolitano, proporcionando valiosas pistas sobre las características de fuentes sísmicas futuras en esta área. Este terremoto, junto con su correspondiente tsunami, ha sido reconocido como uno de los más significativos en la historia escrita de la región. De hecho, su alcance fue amplio, devastando edificaciones a lo largo de más de 1000 km de la costa y desencadenando un poderoso tsunami que llegó incluso hasta Japón.

Los documentos históricos que describen los efectos de los tsunamis arrojan información interesante sobre el alcance y la magnitud de los eventos. Se ha registrado que el tsunami de 1730 inundó edificios que se encontraban a una distancia aproximada de 11 m y 9 m sobre el nivel del mar, ubicados a 850 m y 350 m de la costa en Valparaíso y Penco, respectivamente. Específicamente, en Valparaíso, las observaciones indican una altura máxima del tsunami de alrededor de 11 m en la zona de Las Agustinas (Convento San Agustín). Este valor concuerda con los aproximadamente 10 m y 9 m inferidos en las localidades de Las Mercedarias (Iglesia de la Merced) y La Matriz (Iglesia La Matriz), respectivamente (ver Figura 2.8).

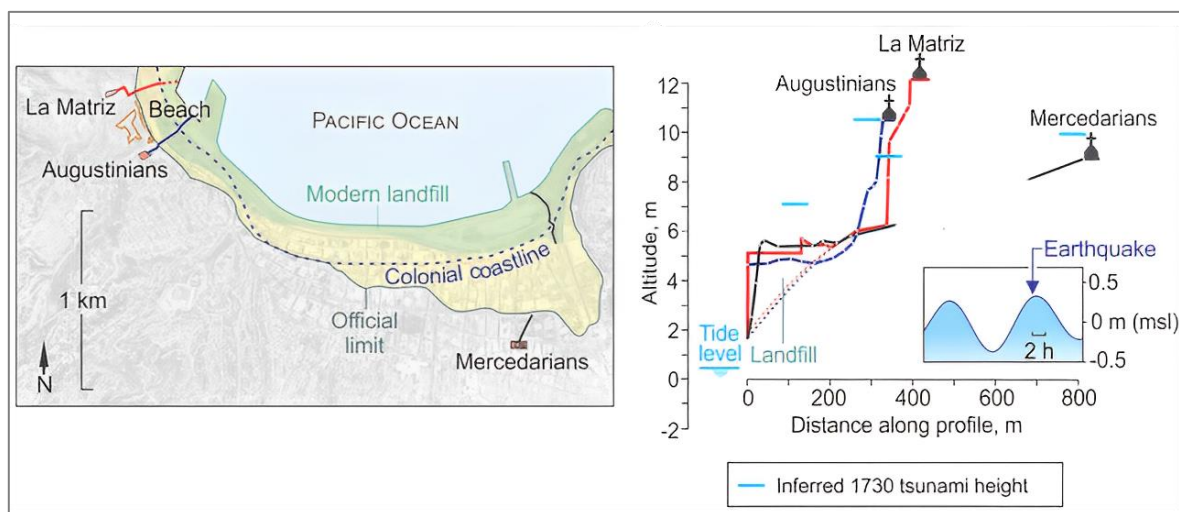


Figura 2.8 Alturas y extensión de las inundaciones del tsunami de 1730 inferidas de documentos históricos.

Fuente: Carvajal *et al.* (2017b)

Es importante notar que, para alcanzar el área de Los Mercedarios, el tsunami se adentró al menos 500 m tierra adentro, partiendo desde la línea actual de la costa, lo cual evidencia la intensidad de este fenómeno. Las observaciones históricas en Valparaíso y Penco apuntan hacia una magnitud estimada del terremoto de 1730 en el rango de Mw 9.1-9.3. Esta estimación se alinea con las alturas de tsunami documentadas en Japón en ese año, lo cual sugiere una magnitud total del tsunami en concordancia con registros instrumentales de terremotos chilenos que alcanzan aproximadamente Mw 9.3.

Por lo tanto, los análisis numéricos realizados tanto para Penco como para Valparaíso indican que una ruptura sísmica de 600 a 800 km de longitud, con un deslizamiento promedio entre 10 y 14 m y un máximo de 20 a 28 m, proporciona una explicación más precisa para las alturas y alcances observados en los tsunamis. Estos hallazgos subrayan la importancia de comprender eventos pasados para anticipar y mitigar posibles amenazas sísmicas en la región (Carvajal *et al.* (2017b)).

## **3 Objetivos**

### **3.1 Objetivo general**

El objetivo general de esta investigación es evaluar y caracterizar los terremotos que provocan las inundaciones más severas en la conurbación costera de Valparaíso-Viña del Mar, Chile. Además, se busca analizar la presencia de patrones en las concentraciones de deslizamiento cosísmico con el propósito de identificar similitudes entre los terremotos que generan tsunamis de gran magnitud. Este estudio se llevará a cabo mediante la utilización de escenarios previamente modelados con el software Tsunami HySEA.

### **3.2 Objetivo específico**

- Identificar y jerarquizar los escenarios que generan una mayor área de inundación en cada localidad.
- Observar e identificar patrones comunes entre los escenarios de tsunamis que provocan una mayor inundación y los deslizamientos asociados que los generan.
- Evaluar los datos obtenidos para cada localidad en dominios de interés más acotados.

## 4 Metodología

El objetivo de este estudio es analizar los patrones de comportamiento de los deslizamientos cosísmicos en sismos tsunamigénicos y su impacto en posibles inundaciones en localidades costeras de interés. Para llevar a cabo esta investigación, se dispone de una base de datos compuesta por escenarios de sismos generados de forma estocástica utilizando el software Tsunami Hysea.

Los escenarios de estudio abarcan un rango de magnitud que va desde Mw 8.6 hasta Mw 9.2, y la localidad costera considerada en este análisis es Valparaíso-Viña del Mar.

El trabajo realizado se estructura en base a una jerarquización de los datos de acuerdo con la inundación generada por cada escenario en una localidad en específico. A partir de esta información, se lleva a cabo un proceso inverso para investigar la distribución de los deslizamientos cosísmicos asociados. Para trabajar los datos se utilizaron rutinas de Python hechas por el autor.

### 4.1 Descripción de la base de datos

La base de datos se compone de dos parámetros interrelacionados. En primer lugar, se encuentra la inundación generada por cada sismo tsunamigénico, la cual se caracteriza mediante el parámetro de alturas máximas de flujo. Este parámetro indica el grado de penetración del agua en áreas costeras y el área que abarca. En segundo lugar, se encuentra la distribución de deslizamientos cosísmicos asociados, que describe la extensión y ubicación de los deslizamientos de tierra que ocurren simultáneamente al sismo.

Para la localidad de Valparaíso-Viña del Mar, la base de datos consta de un total de 2800 escenarios. Cada magnitud (Mw 8.6, Mw 8.7, Mw 8.8, Mw 8.9, Mw 9.0, Mw 9.1 y Mw 9.2) cuenta con 400 escenarios disponibles. Estos escenarios, pero con otros parámetros de interés han sido utilizados anteriormente por Zamora et al. (2021).

La zona definida para el análisis de las distribuciones de deslizamiento abarca las longitudes comprendidas entre  $-73.949^{\circ}$  y  $-69.949^{\circ}$ , y las latitudes entre  $-35.8^{\circ}$  y  $-25.0^{\circ}$  (ver Figura 4.1). En cuanto a los límites de la localidad de Valparaíso-Viña del Mar donde se evalúan las inundaciones, se encuentran entre las longitudes  $-71.639^{\circ}$  y  $-71.523^{\circ}$ , y las latitudes entre  $-33.052$  y  $-33.003$  (ver Figura 4.2).



Figura 4.1 Dominio donde se desarrollan los deslizamientos cósmicos (Rectángulo naranja).  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.2 Zona donde se evalúan las inundaciones para Valparaíso- Viña del Mar (rectángulo verde).  
Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 Jerarquización de la base de datos

Para realizar el análisis, el primer paso consiste en jerarquizar la base de datos en orden descendente según el área de inundación generada por las alturas máximas de flujo de cada escenario aplicado a una localidad específica. De esta manera, se puede obtener información sobre los deslizamientos cosísmicos asociados en el mismo orden (ver Figura 4.3). Además, esta jerarquización posibilita determinar el porcentaje de área inundada en relación con el porcentaje de escenarios (ver Figura 4.4), donde el área inundada mayor representa el 100% de área inundable. Este enfoque establece un criterio para discernir qué parte de los datos implica una amenaza potencial para la localidad y cuáles no plantean dificultades significativas.

Asimismo, este procedimiento se realiza también para sublocalidades, con el fin de determinar si requieren un análisis individual en los pasos posteriores o si su comportamiento es similar a la localidad principal y se puede aplicar el mismo criterio de análisis.

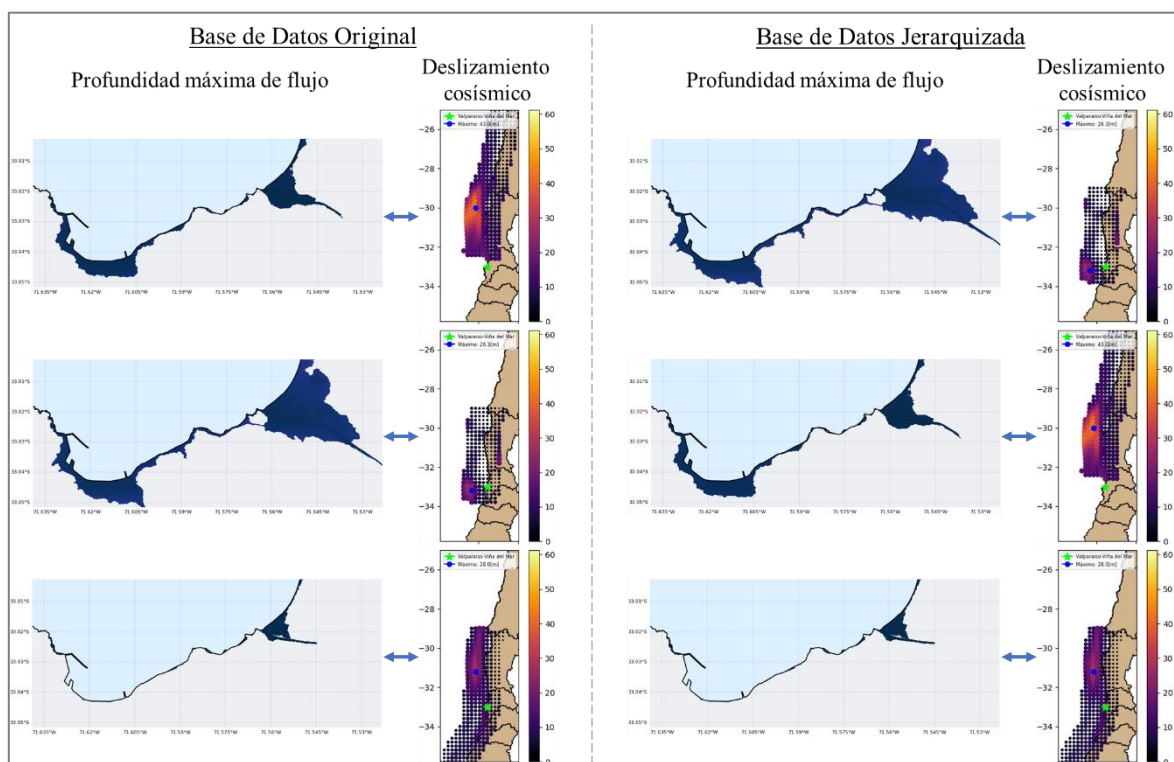


Figura 4.3 (Izquierda) Base de datos original de escenarios compuesta por la inundación por tsunami y la distribución de deslizamientos asociados; (Derecha) Base de datos jerarquizada según el área inundada por tsunami.

Fuente: Elaboración propia.

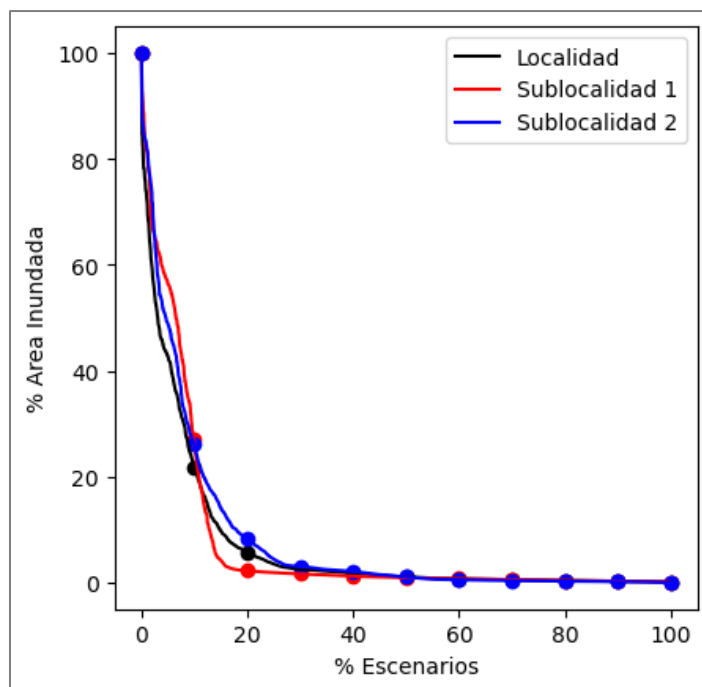


Figura 4.4 Porcentaje de área inundada por tsunami versus el porcentaje de escenarios.  
Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Criterios aplicados para el análisis de los deslizamientos cosísmicos

Una vez establecido el nuevo orden de la base de datos, el enfoque se dirige hacia los deslizamientos cosísmicos. Para analizar estos datos, se aplica un primer criterio que implica agruparlos en subconjuntos correspondientes a intervalos de 1%, lo que resulta en un total de 100 subconjuntos. Posteriormente, para obtener un escenario representativo de deslizamientos para cada subconjunto, se calcula el promedio espacial de los deslizamientos en cada subconjunto y se identifica el valor máximo, su ubicación y la distancia con respecto a la localidad de interés (ver Figura 4.5).

Una vez conocida la ubicación y magnitud del deslizamiento máximo representativo de cada intervalo, se procede a analizar la tendencia en torno a la ubicación de cada uno de estos, destacando la porción de escenarios que generan una mayor vulnerabilidad en la zona costera de interés, la cual se define en la sección 4.2.

Además, como complemento a los resultados obtenidos para cada escenario representativo según el promedio, se realiza el mismo procedimiento para obtener la desviación estándar, los valores máximos y los valores mínimos en el espacio para cada intervalo.

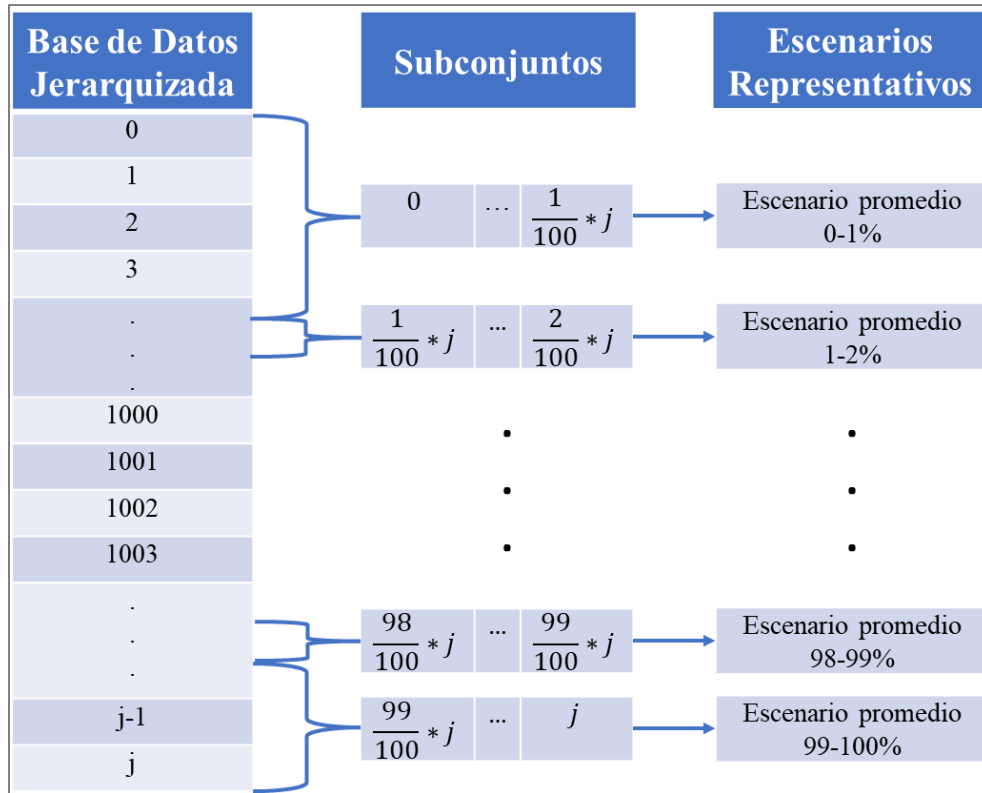


Figura 4.5 Esquema de la obtención de escenarios representativos de cada subconjunto.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 Magnitudes que predominan en eventos tsunamigénicos para la localidad

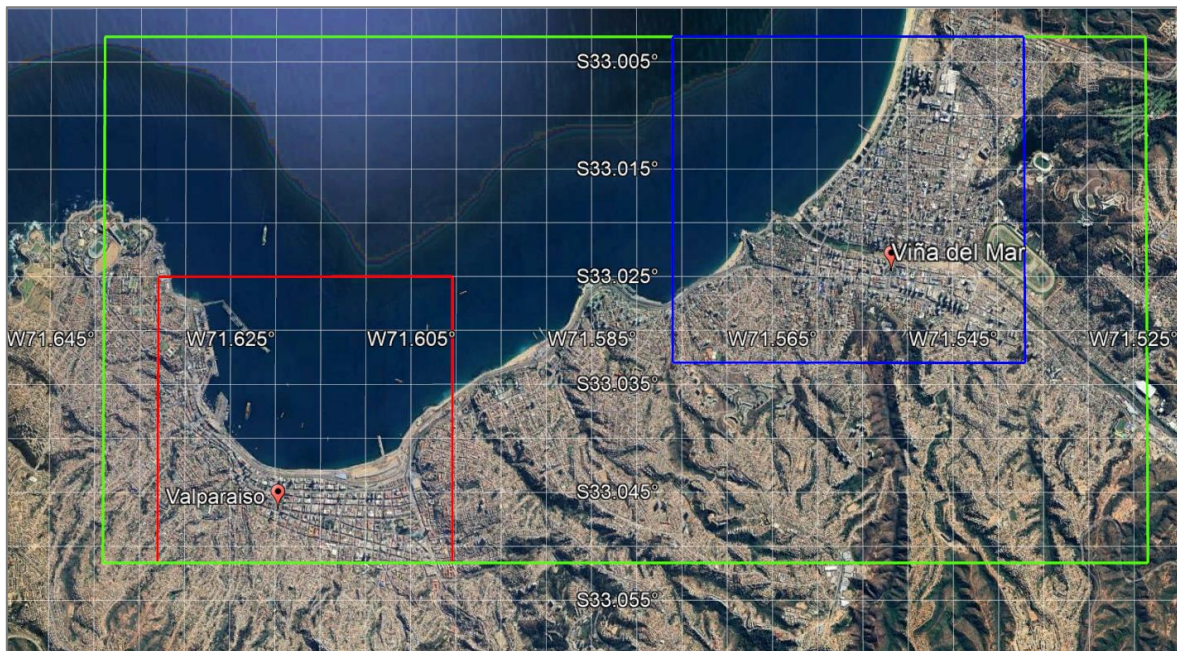
En paralelo a lo descrito anteriormente, se lleva a cabo un análisis del porcentaje de participación de cada magnitud de terremoto fuente en los escenarios que conforman cada subconjunto de datos, centrándose en aquella porción que representa una mayor vulnerabilidad para la localidad. Este análisis tiene como objetivo respaldar la idea de que, más allá de la magnitud, otras características del terremoto, como su ubicación y el deslizamiento cosísmico asociado, desempeñan un papel relevante en el proceso de inundación por tsunamis. Se espera que, aunque los eventos más críticos para la localidad sean predominantemente causados por terremotos de mayor magnitud en el espectro, también exista la posibilidad de que se presenten tsunamis de gran impacto, generados por terremotos de magnitudes más bajas.

## 5 Resultados y Análisis

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la localidad de Valparaíso-Viña del Mar, seguidos por una aproximación al tsunami de 1730 en Valparaíso. Esta aproximación se realiza utilizando los datos disponibles y aplicando la metodología previamente detallada en la sección anterior, junto con la explicación de los criterios empleados en cada paso.

### 5.1 Valparaíso - Viña del Mar y sublocalidades de interés

Se ha realizado un análisis enfocado en la localidad de Valparaíso-Viña del Mar, abarcando tanto el área total como dos sublocalidades específicas: el plan de Valparaíso y el plan de Viña del Mar. El plan de Valparaíso incluye el Barrio Puerto y el Barrio El Almendral, mientras que el plan de Viña del Mar comprende el centro y la Población Vergara (ver Figura 5.1).



*Figura 5.1 Límites para la localidad Valparaíso-Viña del Mar (rectángulo verde) y las sublocalidades Valparaíso y Viña del Mar (rectángulo rojo y azul, respectivamente).*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.1.1 Determinación del porcentaje de escenarios significativos para el análisis

Una vez que la base de datos se ha jerarquizado por separado para cada caso, se procede a comparar el comportamiento de cada zona en términos de área inundada y la proporción de escenarios involucrados (ver Figura 5.2 y Figura 5.3).

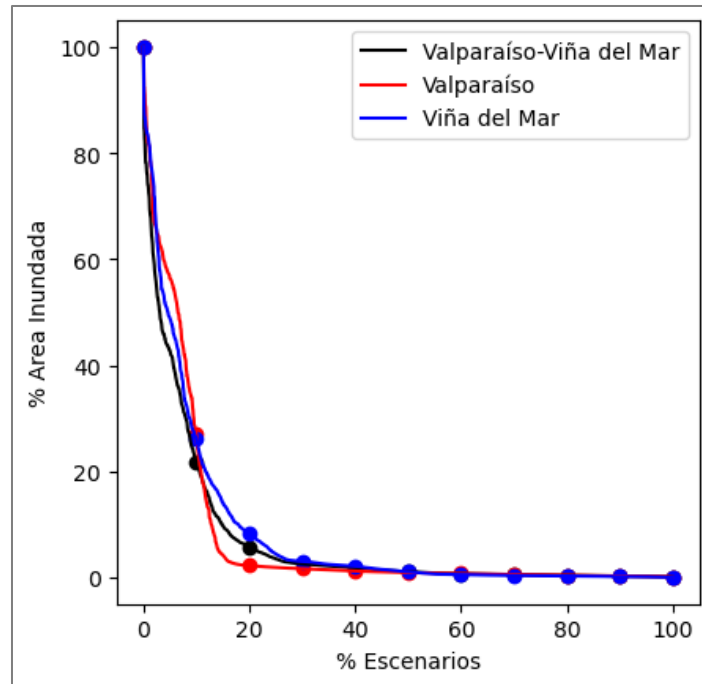
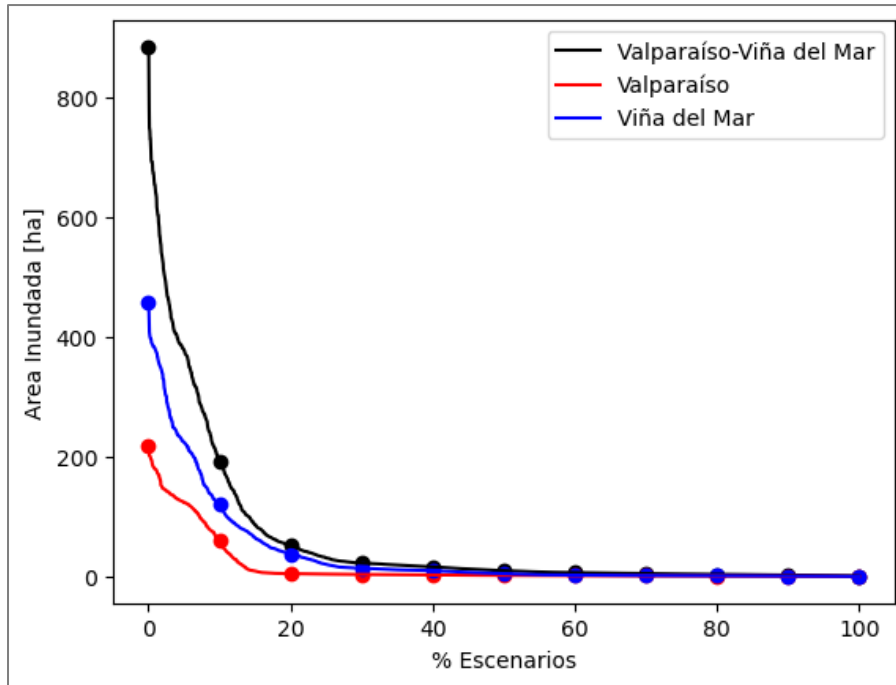


Figura 5.2 Porcentaje de área inundada por tsunami versus el porcentaje de escenarios para Valparaíso-Viña del Mar y sus sublocalidades.

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 5.3 Área inundada por tsunami en hectáreas versus el porcentaje de escenarios para Valparaíso-Viña del Mar y sus sublocalidades.  
Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 5.1 Resumen de lo expuesto en las Figura 5.2 y Figura 5.3.

Fuente: Elaboración propia.

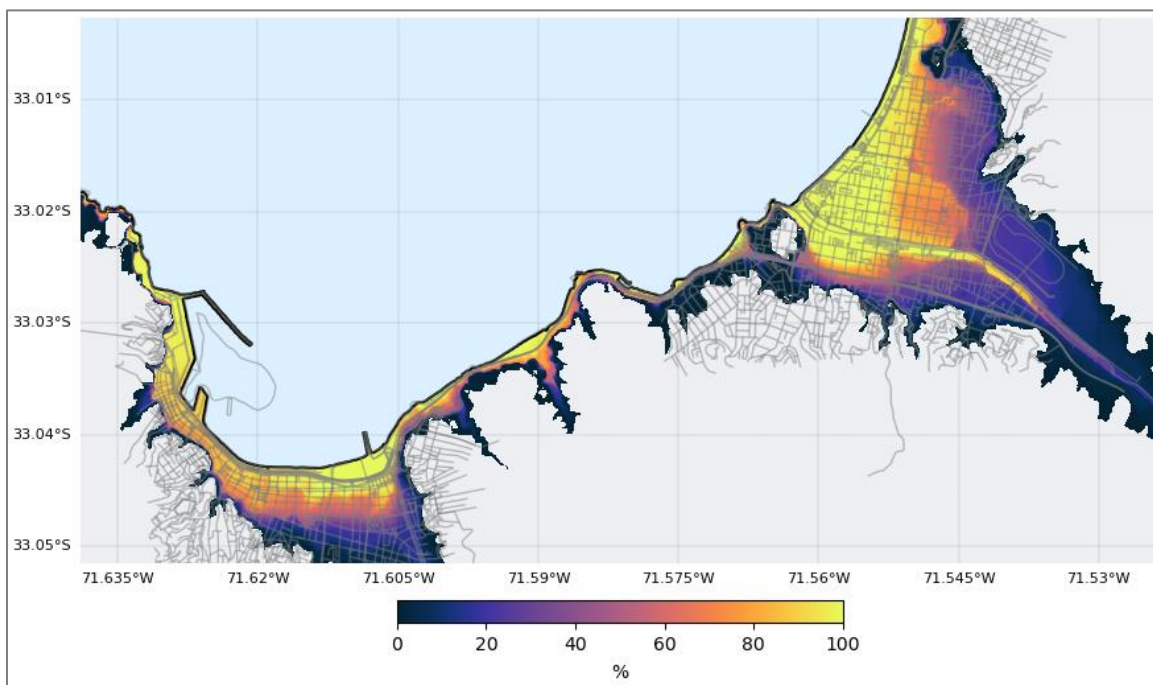
% Escenarios	% Área Inundada			Área Inundada [ha]		
	Valparaíso - Viña del Mar	Valparaíso	Viña del Mar	Valparaíso - Viña del Mar	Valparaíso	Viña del Mar
0%	100.0%	100.0%	100.0%	884.75	219.42	459.08
10%	21.7%	27.3%	26.3%	191.76	59.24	120.64
20%	5.8%	1.8%	8.2%	51.35	5.01	37.84
30%	2.6%	1.4%	3.1%	22.76	3.70	14.09
40%	1.8%	1.0%	2.2%	16.32	2.70	10.04
50%	1.1%	0.8%	1.1%	9.84	2.10	5.10
60%	0.8%	0.7%	0.5%	6.66	1.70	2.51
70%	0.6%	0.5%	0.4%	5.13	1.32	1.95
80%	0.4%	0.4%	0.3%	3.81	1.00	1.43
90%	0.3%	0.3%	0.2%	2.68	0.69	0.99
100%	0.1%	0.1%	0.1%	0.62	0.18	0.24

Se aprecia una tendencia similar en las tres zonas bajo análisis, aunque en Viña del Mar se registran porcentajes ligeramente superiores de área inundada en comparación con las otras curvas (ver Figura 5.2). La Tabla 5.1 presenta una síntesis de la información en intervalos del 10%, lo cual posibilita un análisis más adecuado de los datos. En este contexto, se nota que en el primer 10% de los escenarios, se produce una variación sustancial en el porcentaje de área inundada, inundando como mínimo un 21.7% del área total. En el intervalo del 10% al 20%, la variación del área inundada es menor pero aún significativa; por ejemplo, el 20% de los escenarios inunda al menos un 5.8% del área total, lo que se traduce en al menos 5 hectáreas en Valparaíso y 37.8 hectáreas en Viña del Mar, considerando un máximo de 219 y 459.1 hectáreas, respectivamente.

Entre el 20% y el 30% de los escenarios, se evidencia una variación del porcentaje de área inundada de un 3.2%. Sin embargo, para Viña del Mar, esta variación es mayor, alcanzando el 5.2%, lo que implica que se inundan como mínimo 14.1 hectáreas. Dado esto, se considera tentativamente que el punto de corte para continuar con el análisis podría basarse en el porcentaje de escenarios que generan inundaciones en Viña del Mar. Esto se debe a que Viña del Mar muestra áreas de inundación más amplias en comparación con Valparaíso para una misma porción de escenarios.

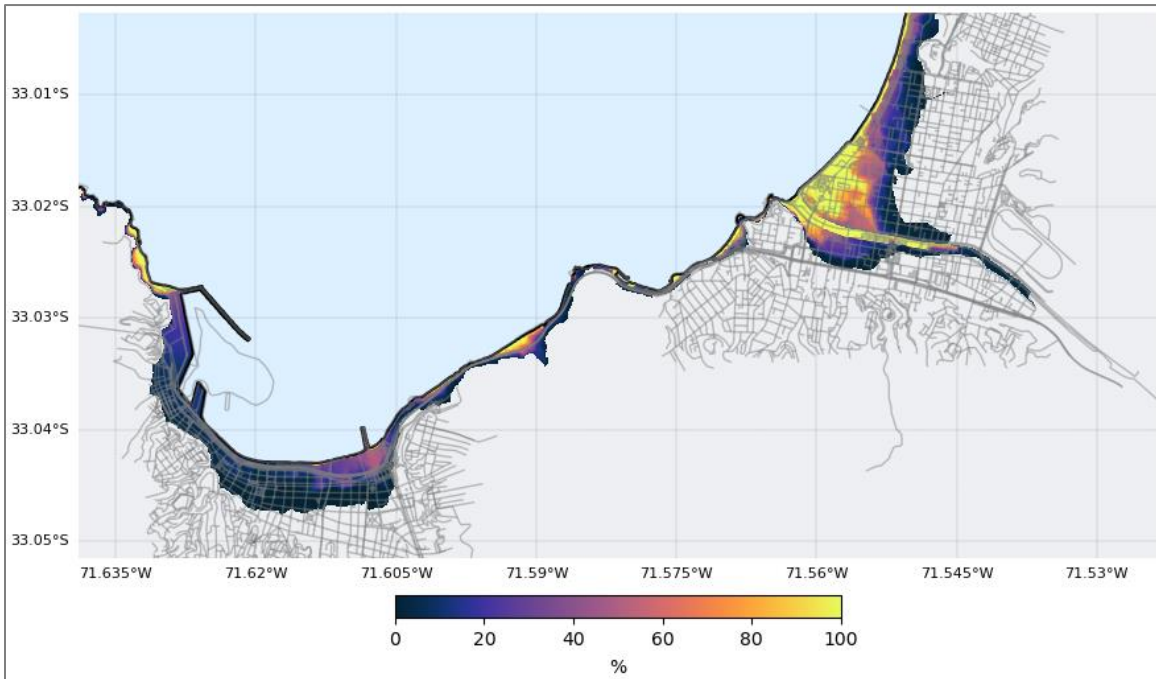
Para complementar lo observado en las Figura 5.2 y Figura 5.3, se han agrupado los escenarios en intervalos representativos del 10% de la base de datos. Cada intervalo está compuesto por un subconjunto de 280 escenarios, teniendo en cuenta que el total de la base

de datos consta de 2800 escenarios. El objetivo de esta agrupación es proporcionar una representación visual del área inundada y el porcentaje de participación de los escenarios en cada intervalo. A continuación, se presenta una vista en planta de Valparaíso-Viña del Mar, donde se muestra el porcentaje de participación de los escenarios en cada intervalo en relación con el área inundada (ver Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 y Figura 5.7).

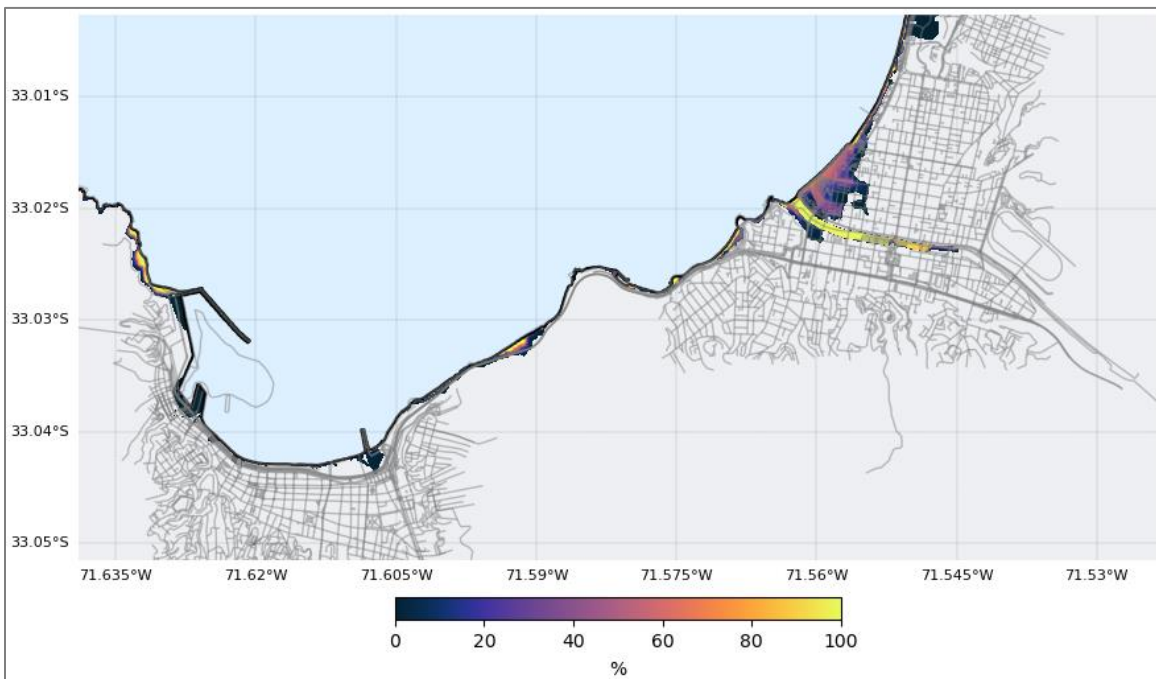


*Figura 5.4 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar, considerando los datos entre un 0 y 10%.*

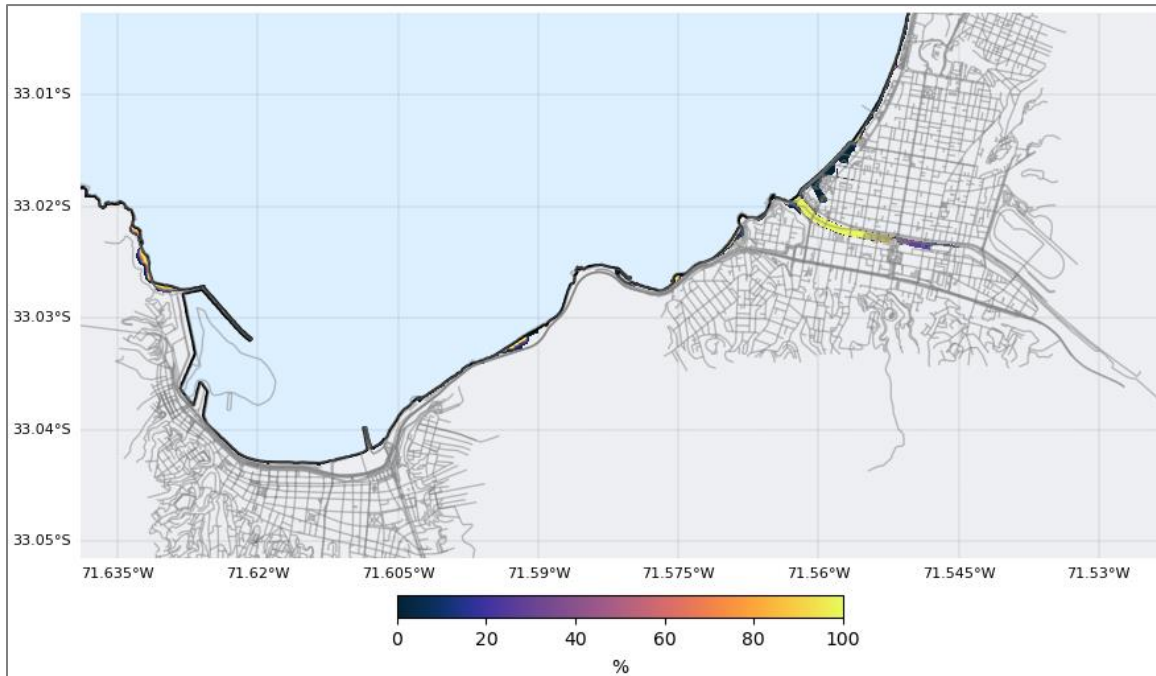
*Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 5.5 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar, considerando los datos entre un 10 y 20%.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 5.6 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar, considerando los datos entre un 20 y 30%.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 5.7 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar, considerando los datos entre un 30 y 40%.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Se observan variaciones considerables en el área inundada generada por cada segmento de datos. En el tramo del 20 al 30%, la inundación afecta el sector del Casino de Viña del Mar (plaza Colombia), entre la Av. Perú y la Calle 4 Poniente, mientras que Valparaíso solo se ve afectado en su línea costera. En el tramo del 30 al 40%, la inundación abarca el estero Marga Marga y la Av. Perú, lo que podría compararse con una marejada en el área. No se detectan inundaciones en Valparaíso en este último tramo.

Por lo tanto, a través de la representación gráfica en las Figura 5.2 y Figura 5.3 y las vistas en planta de la localidad en las Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 y Figura 5.7, se establece un criterio claro: hasta un **30%** de los escenarios de sismos, una vez jerarquizados, representan una vulnerabilidad para la localidad en caso de una inundación por tsunami. En base a esta observación, se considera que este porcentaje es relevante para el análisis posterior de los deslizamientos cosísmicos que generan cada tsunami.

### **5.1.2 Análisis de los deslizamientos cosísmicos**

De acuerdo con lo expuesto en la sección 4.3, se procede a la agrupación de los escenarios en subconjuntos que corresponden a intervalos del 1% de la base de datos. Teniendo en cuenta un total de 2800 escenarios, cada subconjunto se compone de 28 escenarios, lo que da como resultado un total de 100 subconjuntos. Las Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11 y Figura 5.12 presentan de manera ilustrativa la distribución promedio de los deslizamientos cosísmicos para los primeros 10 intervalos. En estas figuras se resalta la ubicación del deslizamiento máximo (representado por un punto azul) junto con su magnitud

correspondiente. Además, se incluye la localización de Viña del Mar (longitud  $-71.5518^\circ$  y latitud  $-33.0245^\circ$ ) como punto de referencia (marcado con una estrella verde), así como radios fijos de 50, 100, 150 y 200 kilómetros alrededor de dicha ciudad. En cada caso, se puede observar que el valor máximo (representado por el punto azul) está siempre ubicado dentro de una zona concentrada de deslizamientos de alta magnitud, según la escala de colores dispuesta en cada figura.



Figura 5.8 Deslizamiento cosísmico representativo para los intervalos entre 0-1% (izquierda) y 1-2% (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

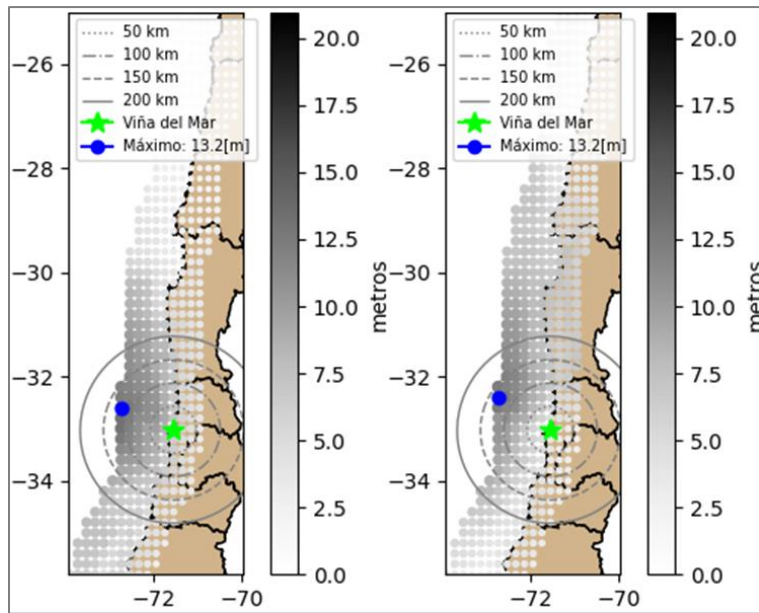


Figura 5.9 Deslizamiento cosísmico representativo para los intervalos entre 2-3% (izquierda) y 3-4% (derecha).  
Fuente: Elaboración propia.

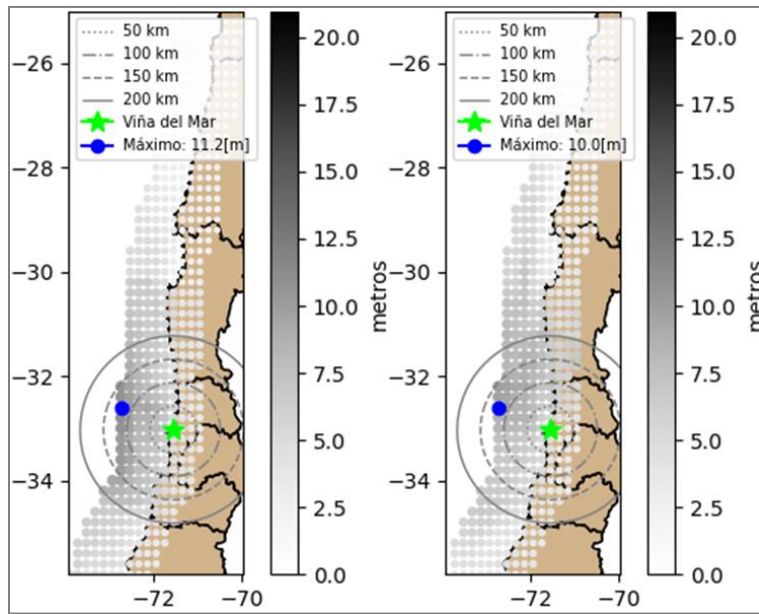


Figura 5.10 Deslizamiento cosísmico representativo para los intervalos entre 4-5% (izquierda) y 5-6% (derecha).  
Fuente: Elaboración propia.

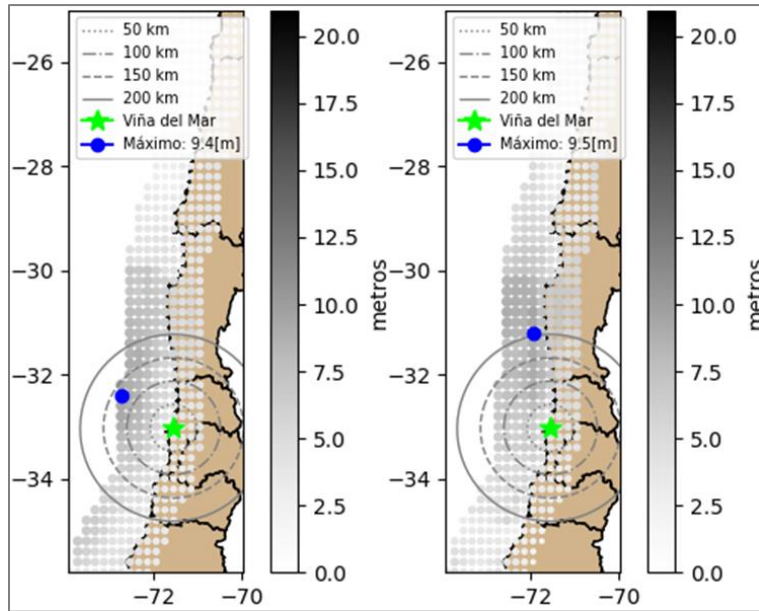


Figura 5.11 Deslizamiento cosísmico representativo para los intervalos entre 6-7% (izquierda) y 7-8% (derecha).  
Fuente: Elaboración propia.

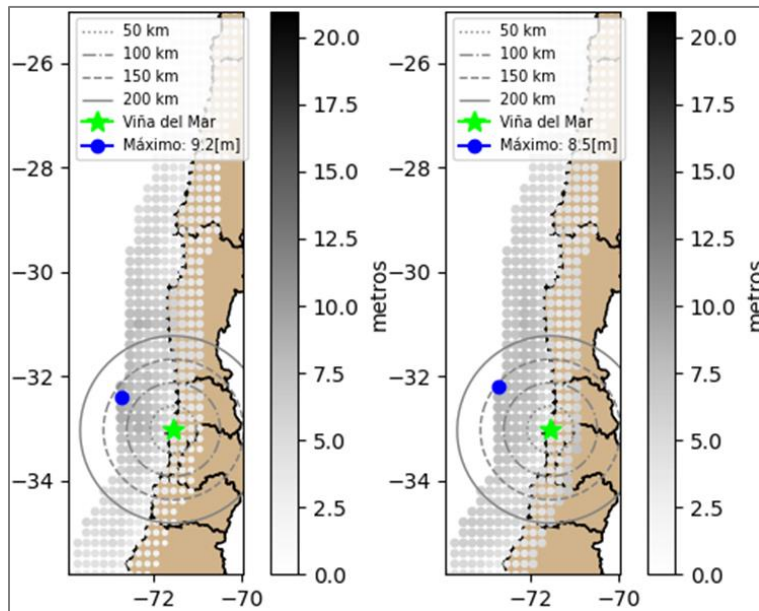
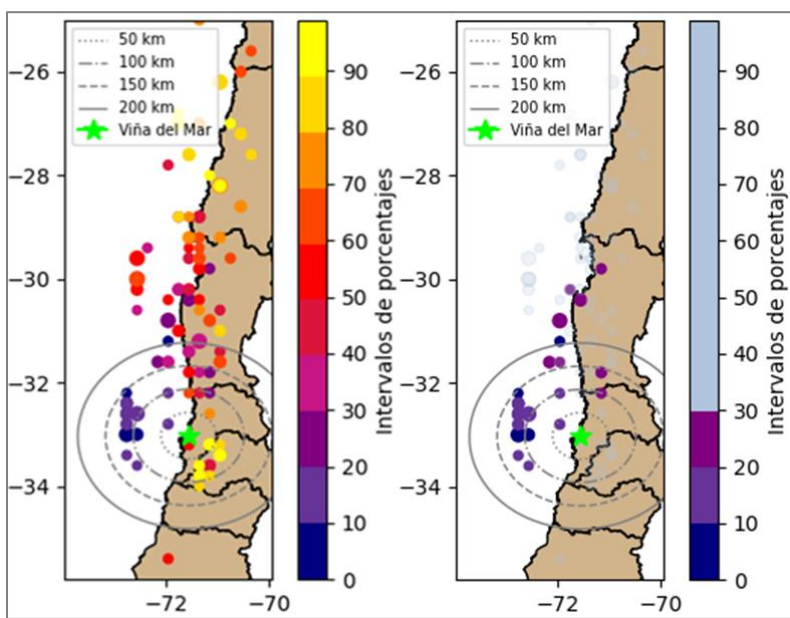


Figura 5.12 Deslizamiento cosísmico representativo para los intervalos entre 8-9% (izquierda) y 9-10% (derecha).  
Fuente: Elaboración propia.

Según el procedimiento descrito, la Figura 5.13 ilustra la dispersión de todos los deslizamientos máximos representativos alrededor de Viña del Mar. El gráfico de la izquierda es idéntico al de la derecha, con la diferencia de que en este último se destaca específicamente el tramo correspondiente al primer 30% de los escenarios, el cual resulta de interés para el análisis. Se observa una dispersión variada de los puntos con una tendencia a desplazarse hacia el norte de Viña del Mar.



*Figura 5.13 Distribución de deslizamientos máximos representativos. (Izquierda) Todos los tramos en base a escala de colores; (Derecha) Destaca los tramos respectivos al 30%.*

*Fuente: Elaboración propia.*

A partir de lo anterior, se procede a desglosar la información en cada tramo que abarca el 30% de los escenarios, destacando los escenarios representativos en intervalos de 10% y observando el comportamiento de los puntos de interés dentro de cada conjunto.

### 5.1.2.1 Deslizamientos máximos representativos del intervalo 0-10%

De la Figura 5.14, se destacan varias observaciones. En primer lugar, se aprecia una marcada tendencia en la distribución de los puntos, con la excepción del intervalo 7-8% el cual se ubica al norte de Viña del Mar, en la IV Región. La concentración de puntos se encuentra predominantemente frente a la costa de Viña del Mar, abarcando un radio que varía entre 93 y 131 kilómetros en una longitud constante, entre las latitudes 32°S y 33°S. Esta área corresponde al tramo definido como la brecha sísmica de Valparaíso. Es relevante mencionar que estos puntos están ubicados en la región más superficial de la interacción interplaca, en las proximidades de la Fosa Perú-Chile, una zona conocida por la ocurrencia de grandes tsunamis.

Los detalles específicos de cada punto se encuentran en la Tabla 5.2, donde se puede observar que los deslizamientos promedio máximos están ordenados de mayor a menor, con magnitudes que oscilan entre 21 y 8.5 metros. Estas magnitudes se encuentran dentro del rango de deslizamientos cosísmicos experimentados en eventos pasados, como los terremotos de Valdivia en 1960 y del Maule en 2010, aunque superan los observados durante el sismo de 2015 en Illapel (ver Figura 2.6 y Tabla 2.1). Por otro lado, en los deslizamientos máximos de los escenarios que conforman cada intervalo, se observan magnitudes cercanas a los 40 metros, e incluso valores aún más elevados. Esto plantea la posibilidad de la ocurrencia de terremotos con epicentro lejano a Viña del Mar, cuya longitud de falla se extienda frente a la costa de la V Región.

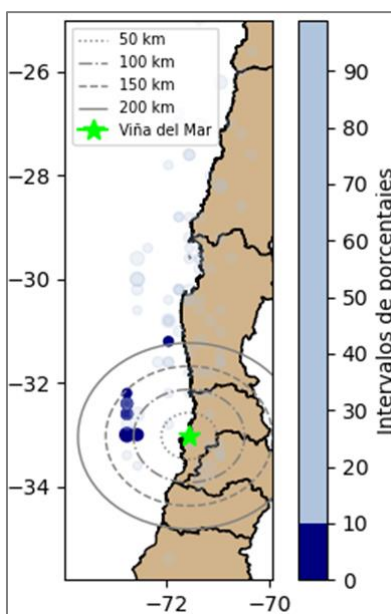


Figura 5.14 Distribución de deslizamientos máximos representativos, resaltando intervalo entre 0 y 10%.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.2 Resumen de deslizamientos representativos para intervalo entre 0-10%.

Fuente: Elaboración propia.

Intervalo	Deslizamiento promedio máximo [m]	Ubicación		Distancia a Viña del Mar [Km]			Valor Máximo de:		
		Longitud	Latitud	Radial	Este-Oeste	Sur-Norte	Desviación Estándar	Máximos	Mínimos
0-1%	21.0	-72.749	-33	111.98	111.97	-0.64	11.1	61.3	9.2
1-2%	13.8	-72.549	-33	93.27	93.27	0.01	8.6	39.2	0.0
2-3%	13.2	-72.749	-32.6	121.68	113.55	43.74	8.8	33.4	5.6
3-4%	13.2	-72.749	-32.4	131.98	114.33	65.93	7.9	36.9	2.3
4-5%	11.2	-72.749	-32.6	121.68	113.55	43.74	8.8	37.7	1.6
5-6%	10.0	-72.749	-32.6	121.68	113.55	43.74	8.3	41.2	0.0
6-7%	9.4	-72.749	-32.4	131.98	114.33	65.93	11.1	60.6	0.0
7-8%	9.5	-71.949	-31.2	205.85	42.65	201.38	10.1	43.3	0.0
8-9%	9.2	-72.749	-32.4	131.98	114.33	65.93	8.8	44.7	0.0
9-10%	8.5	-72.749	-32.2	144.97	115.11	88.12	10.3	47.8	2.0

### Análisis de intervalos específicos

La media de los escenarios correspondientes al intervalo del 7-8% se apartan de la tendencia observada en los demás puntos, ya que se ubican a una distancia de 200 kilómetros al norte de Viña del Mar. En este contexto, el deslizamiento representativo de este escenario muestra una distribución que se extiende desde el norte de Viña del Mar hasta la latitud 30°S en la IV Región. Al comparar esta distribución con la desviación estándar y los deslizamientos máximos de los escenarios que conforman este conjunto, se observa que estos últimos se distribuyen de manera relativamente uniforme, con la excepción del tramo comprendido entre las latitudes 29°S y 31°S, donde se registran los deslizamientos más significativos (ver Figura 5.15). La representación de la inundación asociada a esta concentración de deslizamientos, así como el porcentaje de escenarios que inundan la zona en cuestión, se presenta en la Figura 5.16.

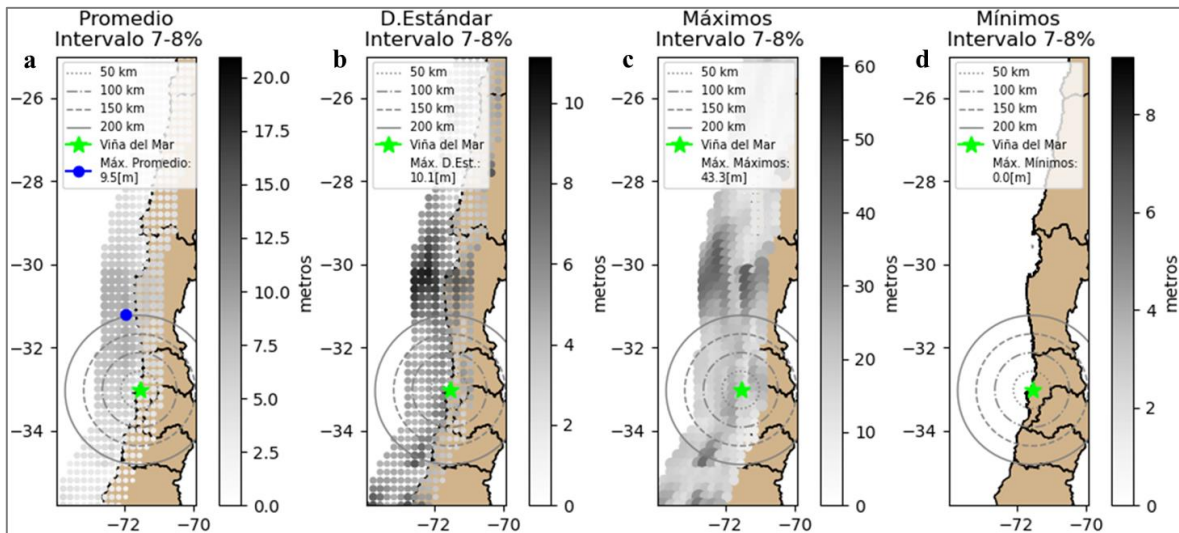


Figura 5.15 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio); (b) Desviación Estándar; (c) Máximos; (d) Mínimos. Intervalo 7-8%.  
Fuente: Elaboración propia.

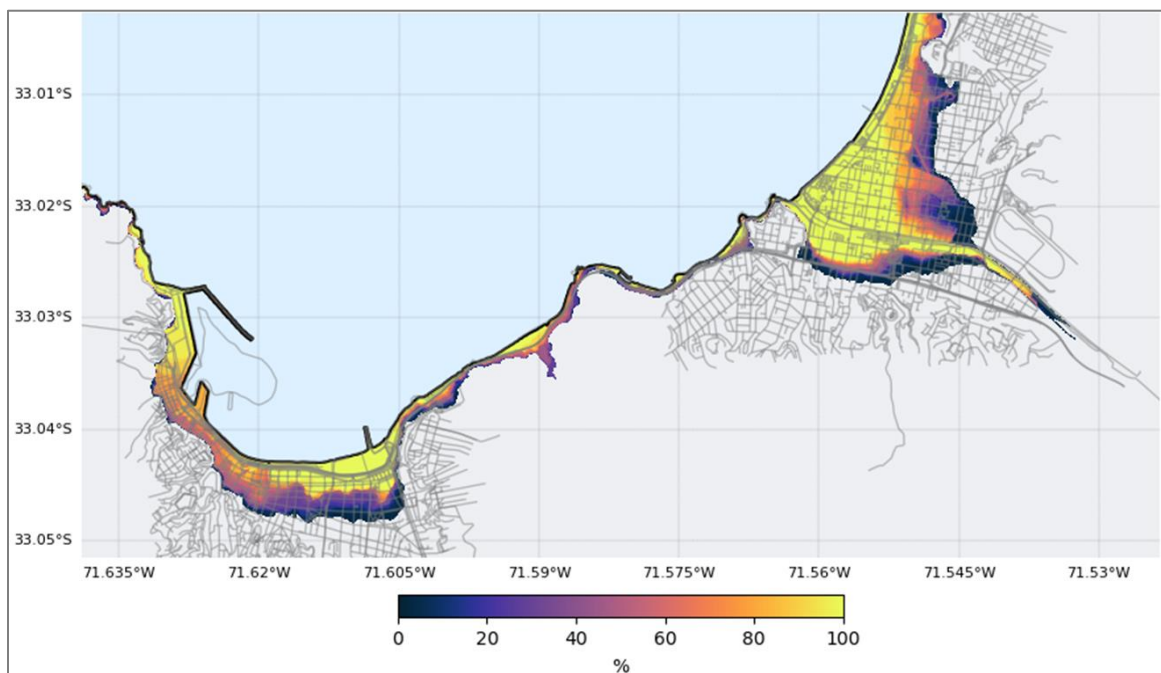


Figura 5.16 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 7-8%.  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.2.2 Deslizamientos máximos representativos del intervalo 10-20%

En la Figura 5.17, se puede apreciar que los puntos se dispersan frente a la costa de la V Región. La mayoría de ellos, a excepción del intervalo 14-15%, se encuentran dentro de un radio máximo de 130 kilómetros respecto a Viña del Mar. Esta disposición refleja una tendencia similar al 10% superior de los escenarios, aunque se observa una mayor variabilidad en cuanto a su distancia a la costa de Viña del Mar. Algunos de ellos incluso se localizan en radios inferiores a 50 km (p.ej., el intervalo 15-16%). En consecuencia, los deslizamientos se sitúan a diferentes profundidades en la sección menos profunda de la falla interplaca.

Por otro lado, al analizar la magnitud de los deslizamientos promedio máximos (ver Tabla 5.3), se nota que varían muy poco en comparación con el intervalo del 0 al 10%, oscilando en valores entre 5.8 y 9.1 metros.

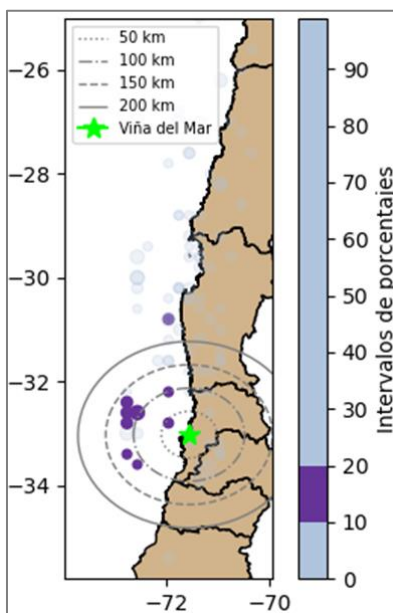


Figura 5.17 Distribución de deslizamientos máximos representativos, resaltando intervalo entre 10 y 20%.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.3 Resumen de deslizamientos representativos para intervalo entre 10-20%.  
Fuente: Elaboración propia.

Intervalo	Deslizamiento promedio máximo [m]	Ubicación		Distancia a Viña del Mar [Km]			Valor Máximo de:		
		Longitud	Latitud	Radial	Este-Oeste	Sur-Norte	Desviación Estándar	Máximos	Mínimos
10-11%	8.6	-72.549	-32.6	104.65	94.77	44.39	7.5	37.6	1.5
11-12%	7.6	-72.749	-32.6	121.68	113.55	43.74	8.8	47.7	0.0
12-13%	8.3	-72.749	-32.8	114.80	112.76	21.55	7.4	36.9	2.7
13-14%	9.1	-72.749	-32.4	131.98	114.33	65.93	8.6	40.1	3.0
14-15%	6.8	-71.949	-30.8	249.62	43.83	245.74	8.5	33.9	0.0
15-16%	5.8	-71.949	-32.8	44.75	37.81	23.93	6.7	32.6	0.0
16-17%	7.5	-71.949	-32.2	98.78	39.65	90.48	7.2	34.3	2.7
17-18%	7.1	-72.749	-32.4	131.98	114.33	65.93	9.5	48.1	0.0
18-19%	5.9	-72.749	-33.4	119.21	110.38	-45.02	7.2	38.5	2.5
19-20%	6.1	-72.549	-33.6	112.75	91.01	-66.56	7.0	35.8	0.0

### Análisis de intervalos específicos

Dentro de los escenarios que difieren de la tendencia general del intervalo del 10% superior y del resto de los puntos en el intervalo 10-20%, destacan los intervalos 14-15%, 15-16% y 19-20%.

En la Figura 5.18, el intervalo 14-15% se destaca como el punto más distante dentro de este conjunto. Se ubica frente a la costa en la zona menos profunda de la falla interplaca, a unos 245 km al norte de Viña del Mar, en la IV Región. El deslizamiento se caracteriza por una mayor longitud de falla y una distribución de deslizamiento más uniforme hacia el mar. Al compararlo con la desviación estándar y los valores de deslizamientos máximos, se observan deslizamientos de mayor magnitud al norte de la latitud 30°S. Esto sugiere que existen escenarios en este intervalo con un origen alejado de Viña del Mar que generan deslizamientos cosísmicos de gran envergadura y a poca profundidad, a diferencia de los sismos que se originan frente a las costas de la V Región, que producen deslizamientos más cercanos al promedio y, por lo tanto, causan inundaciones similares.

En cuanto a la inundación generada por este escenario, se observa que, en Valparaíso, el tsunami supera su punto máximo en Av. Errázuriz. Mientras que, en Viña del Mar, la magnitud de la inundación es aún mayor y alcanza hasta la Calle 2 Poniente (ver Figura 5.19).

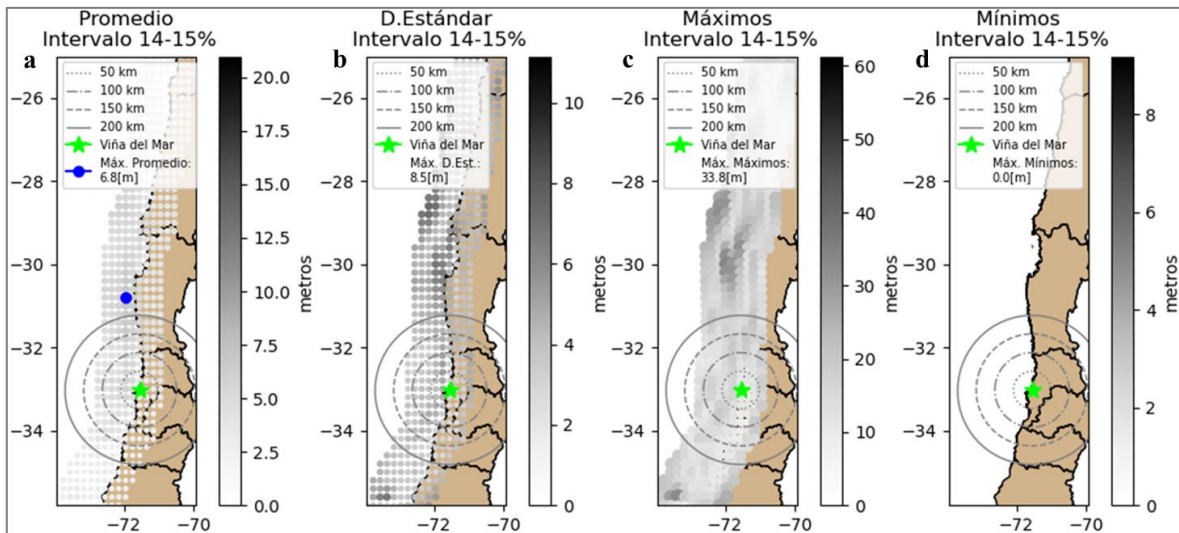


Figura 5.18 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio); (b) Desviación Estándar; (c) Máximos; (d) Mínimos. Intervalo 14-15%.  
Fuente: Elaboración propia.

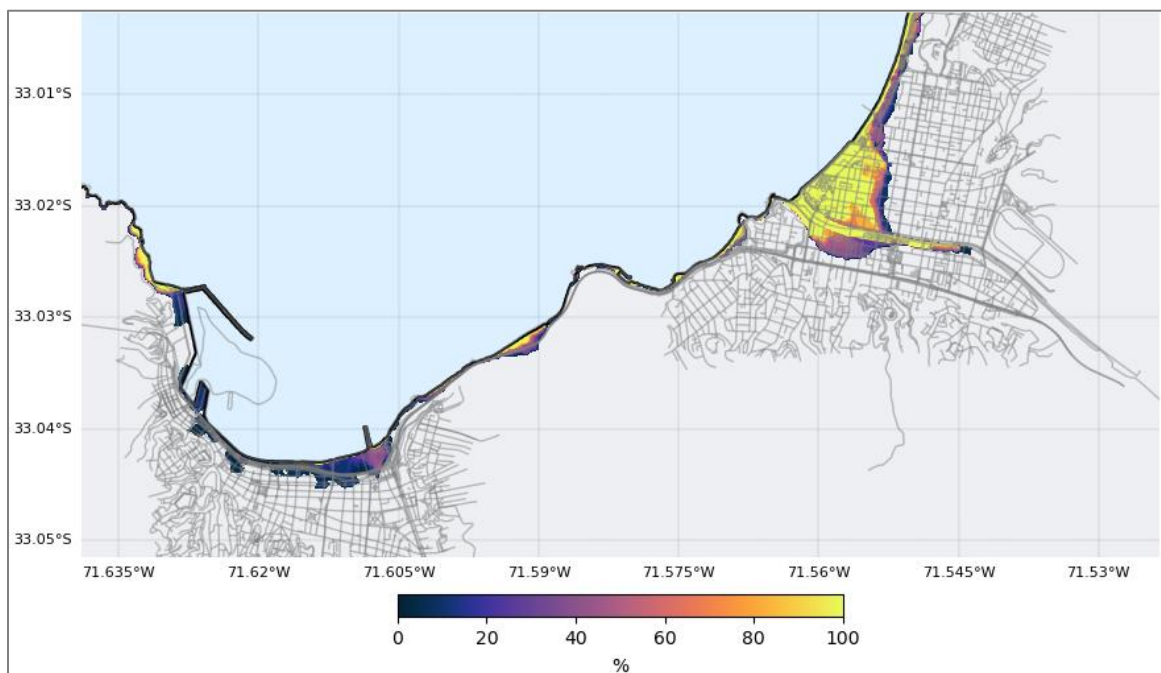


Figura 5.19 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 14-15%.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.20, el intervalo 15-16% se destaca como el punto más cercano a Viña del Mar, ubicado justo frente a la costa, a una distancia de 37.8 kilómetros al oeste de dicha localidad. Este punto se encuentra en la parte menos profunda de la falla interplaca.

se caracteriza por una distribución uniforme al norte de la latitud  $34^{\circ}\text{S}$ , lo que se respalda con la desviación estándar y los valores de deslizamiento máximo de los escenarios que conforman este intervalo. De manera consistente, estos escenarios muestran valores máximos que rondan entre los 15 y 20 metros en todo el ancho del área marina y a lo largo de la zona de estudio, hasta al menos la latitud  $29^{\circ}\text{S}$ .

En términos de la inundación generada por este escenario, se observan efectos similares a los del intervalo 14-15% (ver Figura 5.21).

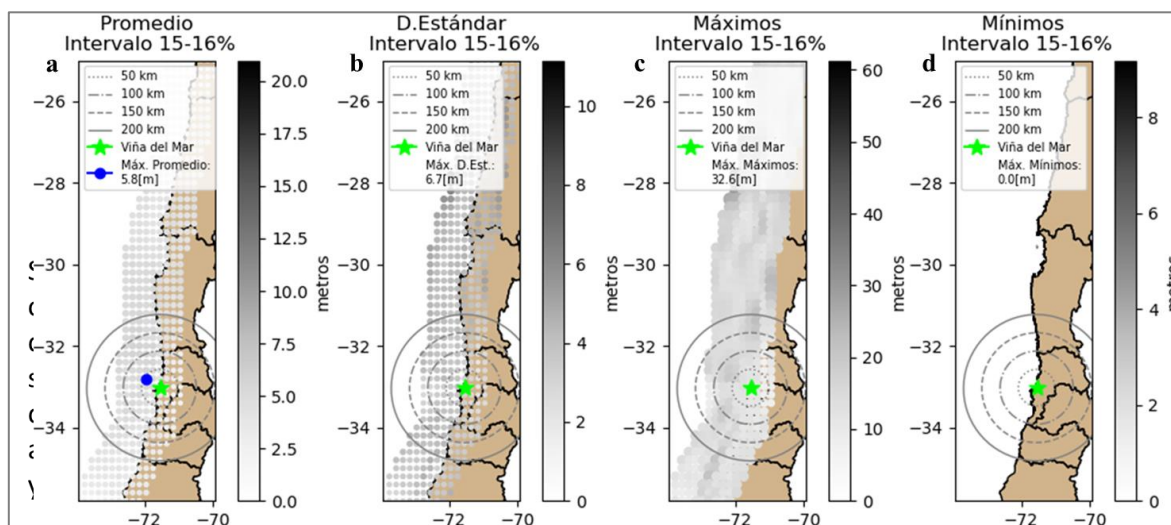
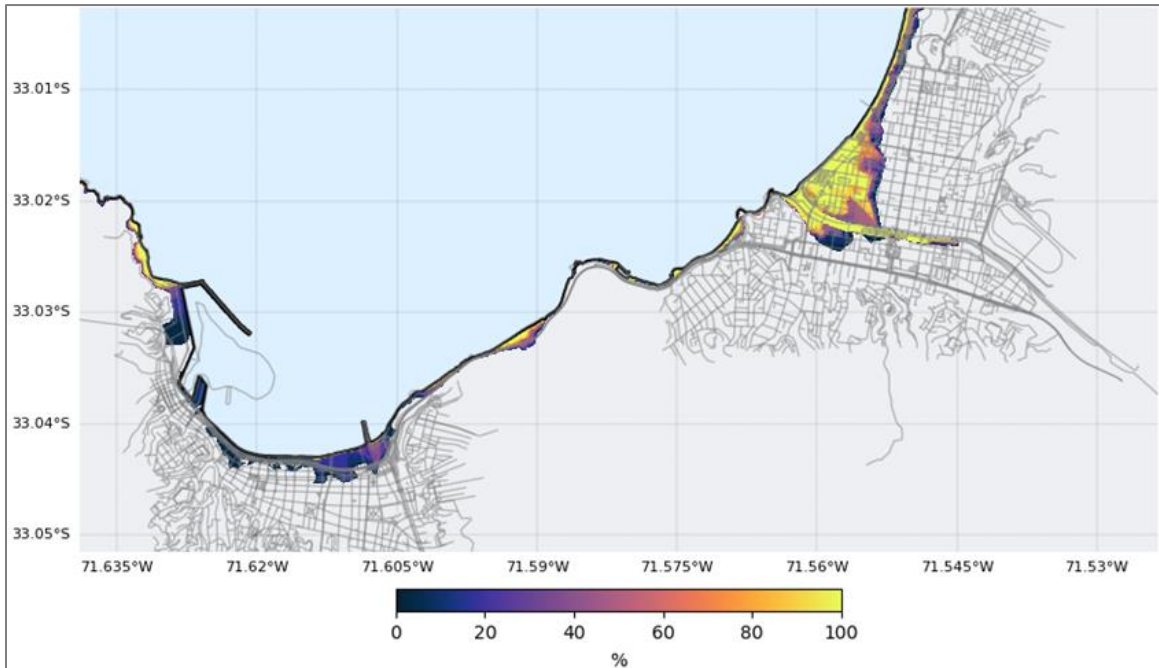


Figura 5.20 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio); (b) Desviación Estándar; (c) Máximos; (d) Mínimos. Intervalo 15-16%.

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 5.21 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 15-16%.*

*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 5.22, el intervalo 19-20% es aquel que representa el punto más al sur en el conjunto de datos, localizado frente a la costa a una distancia de aproximadamente 66 km al sur de Viña del Mar, en la V Región. Este punto se sitúa en la zona menos profunda de la falla interplaca, en las cercanías de la Fosa Perú-Chile. Respecto a su distribución, se caracteriza por mostrar una leve concentración de deslizamientos altos de manera uniforme entre la V y VI Región en la zona menos profunda de la zona de subducción. En cuanto a la desviación estándar, se observa una zona con valores bajos y más acotados que la anterior, justo frente a la V Región, indicando que los escenarios que componen este conjunto desarrollan deslizamientos cosísmicos similares al promedio. Asimismo, al sur de la latitud 34°S, en todo el ancho de la falla, se observan valores más altos en la desviación estándar, sugiriendo un sesgo en el promedio generado por algunos escenarios que desarrollan deslizamientos más elevados en esa área. Además, tanto en la desviación estándar como en los valores de deslizamiento máximo de los escenarios que pertenecen a este intervalo, se destaca una concentración de valores elevados a lo largo de la Fosa Perú-Chile, abarcando desde la latitud 29°S hasta la 31°S, esto corresponde a un escenario particular que registra los deslizamientos más altos de todo el subconjunto.

En relación con la inundación generada por este escenario, se observa que, en Valparaíso, el tsunami es prácticamente imperceptible, afectando solo algunos sectores de la línea de costa, como la Playa San Mateo. Por otro lado, en Viña del Mar, la inundación afecta la línea de costa y el área que va desde la Av. Perú hasta la Calle 3 Poniente (ver Figura 5.23).

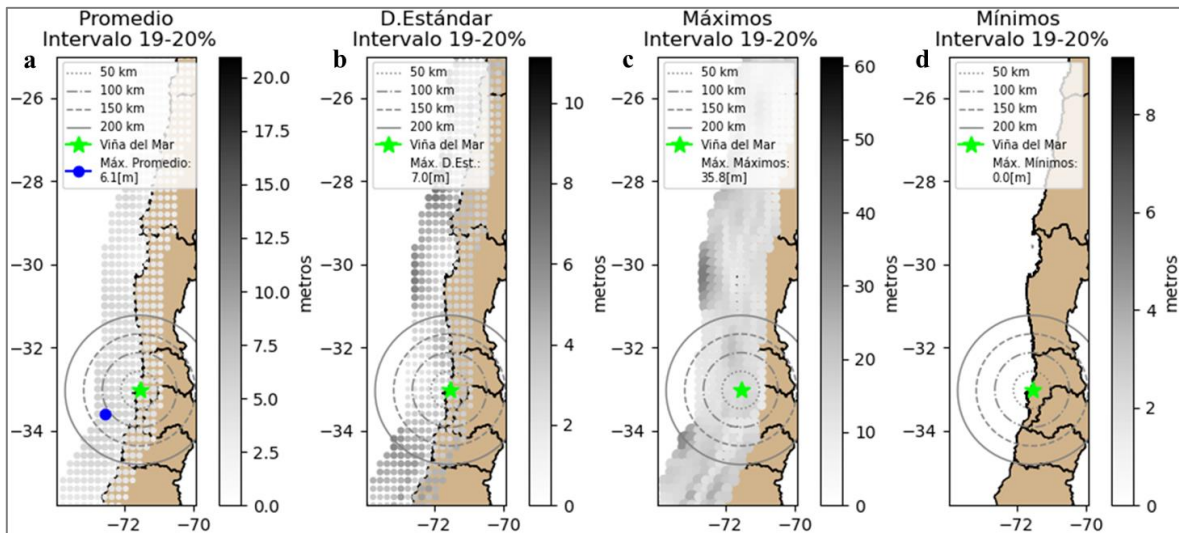


Figura 5.22 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio); (b) Desviación Estándar; (c) Máximos; (d) Mínimos. Intervalo 19-20%.  
Fuente: Elaboración propia.

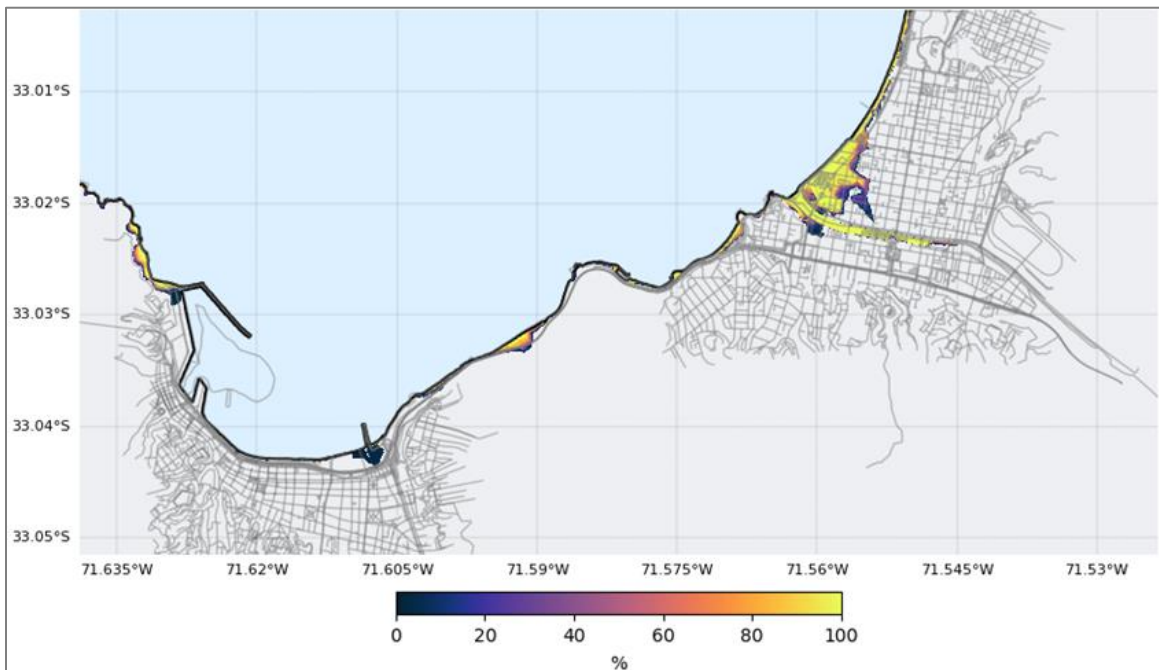


Figura 5.23 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 19-20%.  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.2.3 Deslizamientos máximos representativos del intervalo 20-30%

En la Figura 5.24, se observa una dispersión de puntos hacia el norte de Viña del Mar, distribuidos principalmente a lo largo de la IV Región, con algunos ubicados en el interior del continente en la zona más profunda de la interacción de las placas, sin una tendencia clara. La mayoría de los puntos se encuentran al norte de la latitud 32°S, lo que los sitúa fuera de la brecha sísmica de Valparaíso. Sin embargo, esto no implica que la extensión de sus deslizamientos no alcance dicha brecha.

Por otro lado, la magnitud de los deslizamientos promedio máximos varía en un rango de 5.8 a 8 metros, magnitudes comparables con el terremoto de Illapel de 2015. En cuanto a los valores máximos de deslizamiento cosísmico experimentados por los escenarios que conforman este conjunto, se sitúan en valores similares a los conjuntos analizados anteriormente, superando los 30 metros como máximo (ver Tabla 5.4).

Es importante destacar que, a diferencia de los intervalos previamente analizados, los escenarios de este conjunto no afectan a Valparaíso, pero sí a Viña del Mar.

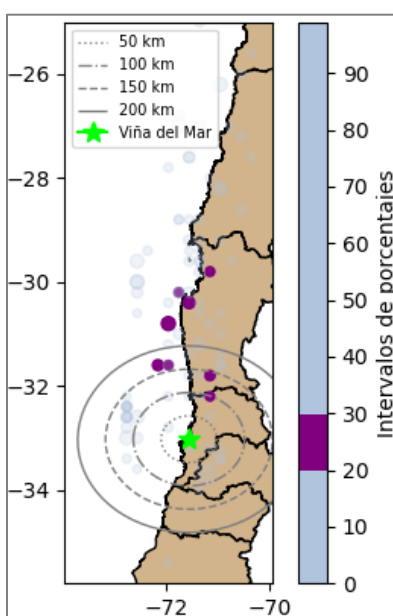


Figura 5.24 Distribución de deslizamientos máximos representativos, resaltando intervalo entre 20 y 30%.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.4 Resumen de deslizamientos representativos para intervalo entre 20-30%.  
Fuente: Elaboración propia.

Intervalo	Deslizamiento promedio máximo [m]	Ubicación		Distancia a Viña del Mar [Km]			Valor Máximo de:		
		Longitud	Latitud	Radial	Este-Oeste	Sur-Norte	Desviación Estándar	Máximos	Mínimos
20-21%	7.4	-71.949	-30.8	249.62	43.83	245.74	8.1	40.6	0.0
21-22%	5.7	-71.549	-30.4	291.10	6.55	291.03	7.5	39.1	0.0
22-23%	6.1	-72.149	-31.6	167.76	60.45	156.49	9.8	47.4	0.0
23-24%	6.8	-71.549	-30.4	291.10	6.55	291.03	6.8	29.7	0.0
24-25%	7.0	-71.149	-31.8	141.01	-34.90	136.62	7.2	37.9	0.0
25-26%	7.8	-71.149	-29.8	359.64	-30.64	358.34	9.0	47.6	0.0
26-27%	8.0	-71.149	-32.2	98.96	-35.78	92.27	10.2	44.4	2.9
27-28%	5.8	-71.949	-31.6	162.40	41.46	157.02	6.3	28.8	1.1
28-29%	6.1	-71.749	-30.2	313.86	26.31	312.75	6.6	30.7	0.0
29-30%	6.1	-71.949	-30.8	249.62	43.83	245.74	7.6	39.3	0.0

### Análisis de intervalos específicos

Dentro de los escenarios que comprenden el intervalo de 20-30%, destacan los intervalos 22-23%, 24-25% y 25-26%.

En la Figura 5.25, el intervalo 22-23% sobresale como el punto más cercano a Viña del Mar, ubicado mar adentro en la zona menos profunda de la interacción interplaca. Esta condición también se comparte con el intervalo 27-28%, y ambos registran un deslizamiento promedio máximo cercano a los 6 metros. En el escenario promedio, se observa un deslizamiento uniforme entre las latitudes 30°S y 34°S, así como a distintas profundidades en la zona de subducción. Esto se respalda con una desviación estándar baja y constante en la misma zona descrita, lo que es consistente con el comportamiento de los deslizamientos máximos en los escenarios que componen este intervalo. También se observa una mayor desviación estándar y valores máximos más elevados al sur de la latitud 34°S en la VI Región, así como valores extremos a diversas profundidades en la latitud 34°S y valores extremos al norte de la latitud 28°S en la III Región, con deslizamientos que superan los 30 metros y se ubican próximos a la línea de costa en la zona más profunda de la interacción interplaca. Esto sugiere que hay escenarios que conforman este intervalo con origen alejado de Viña del Mar, los cuales desarrollan deslizamientos cosísmicos elevados a profundidades intermedias, a diferencia de los sismos que se generan frente a las costas de la V Región, que producen deslizamientos cercanos al promedio y, por lo tanto, causan inundaciones similares.

En lo que respecta a la inundación generada por este escenario, se observa que, en Valparaíso, el tsunami llega solo hasta sus playas. Mientras que, en Viña del Mar, la magnitud de la inundación es mayor, inundando sus playas y el sector de Av. Perú hasta la Calle 4 Poniente (ver Figura 5.26).

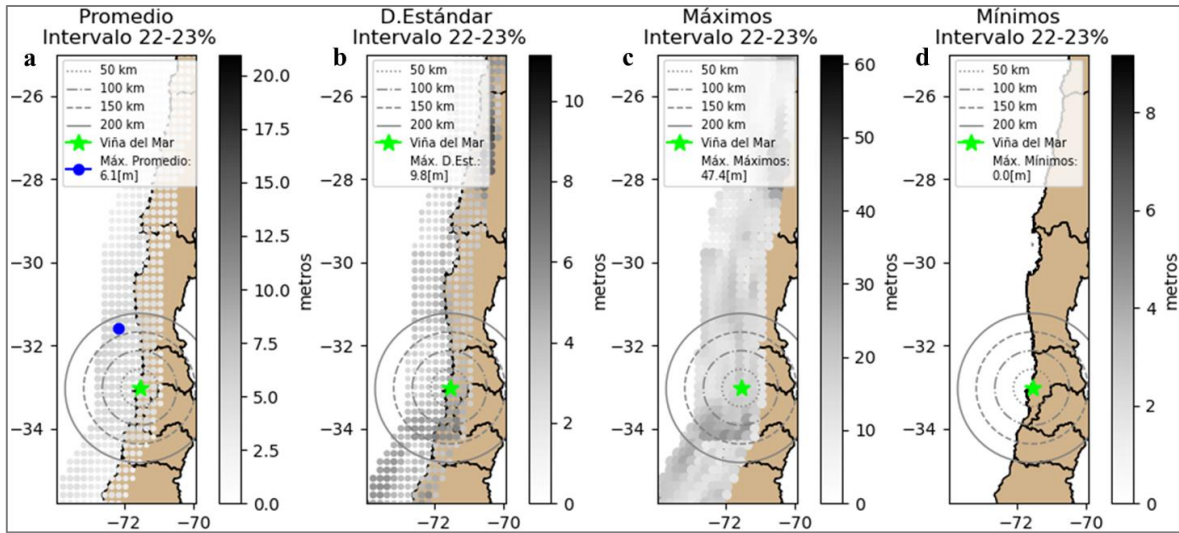


Figura 5.25 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio); (b) Desviación Estándar; (c) Máximos; (d) Mínimos. Intervalo 22-23%.

Fuente: Elaboración propia.

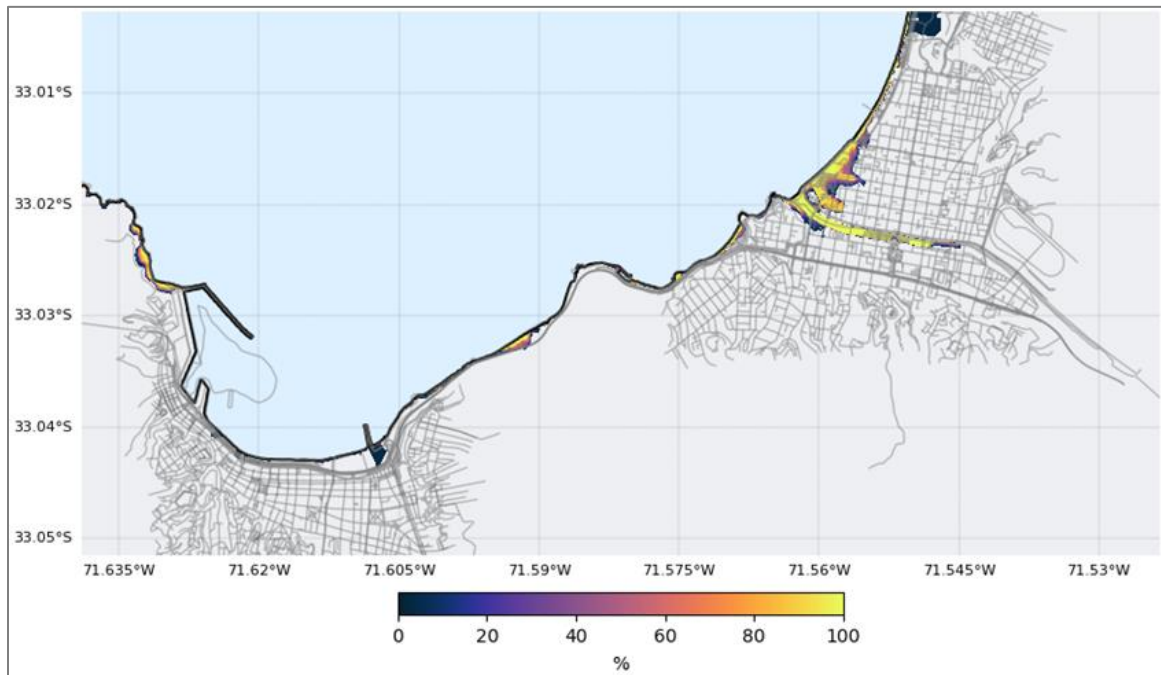


Figura 5.26 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 22-23%.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.27, el intervalo 24-25% se destaca como uno de los puntos ubicados en el continente, en la zona profunda de la interacción interplaca y más cercano a Viña del Mar. Esta condición también se comparte con el intervalo 26-27%. No obstante, el último registra un deslizamiento promedio máximo 1 metro mayor que el intervalo bajo análisis.

En esta área, se observa un deslizamiento promedio que se mantiene relativamente constante en todo el espectro de profundidades de la zona de subducción entre la IV y V Región. Sin embargo, en lo que respecta a la desviación estándar y los desplazamientos máximos de los escenarios que conforman este intervalo, se identifica un sesgo de valores altos en la zona más profunda de la interacción interplaca, especialmente entre las latitudes 31°S y 33°S. Además, se detectan valores elevados en la zona más somera de la subducción, al norte de la latitud 31°S. Esto sugiere que existen escenarios que difieren significativamente de la media y presentan concentraciones de deslizamiento cosísmico alto en estas áreas.

Estos escenarios provocan inundaciones, como las que se muestran en la Figura 5.28. En Valparaíso, el tsunami llega únicamente hasta sus playas. En contraste, en Viña del Mar, la magnitud de la inundación es mayor, afectando sus playas y extendiéndose hacia el sector de Av. Perú hasta la Calle 5 Poniente.

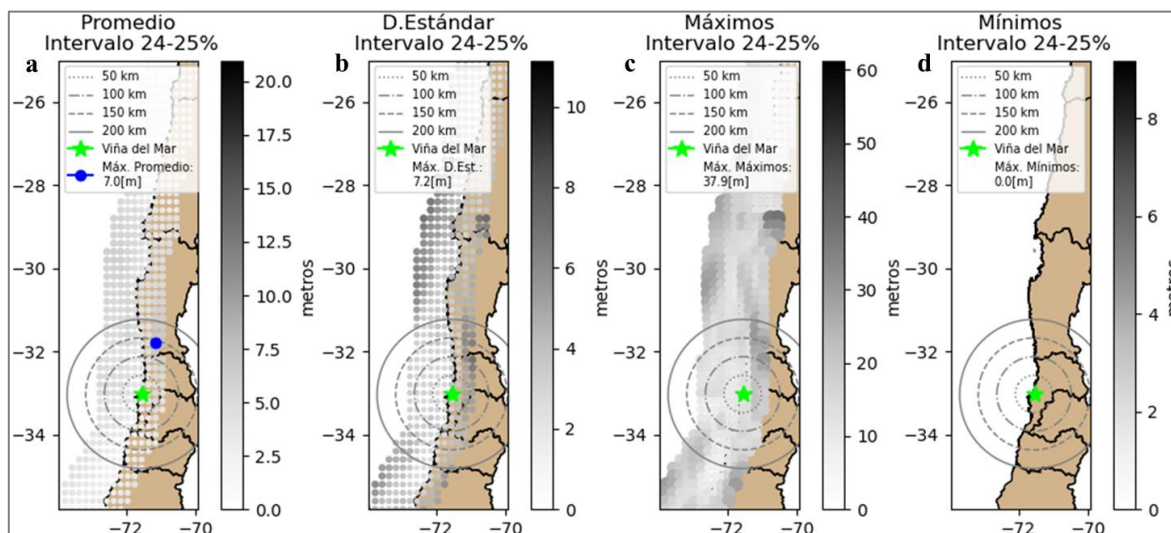
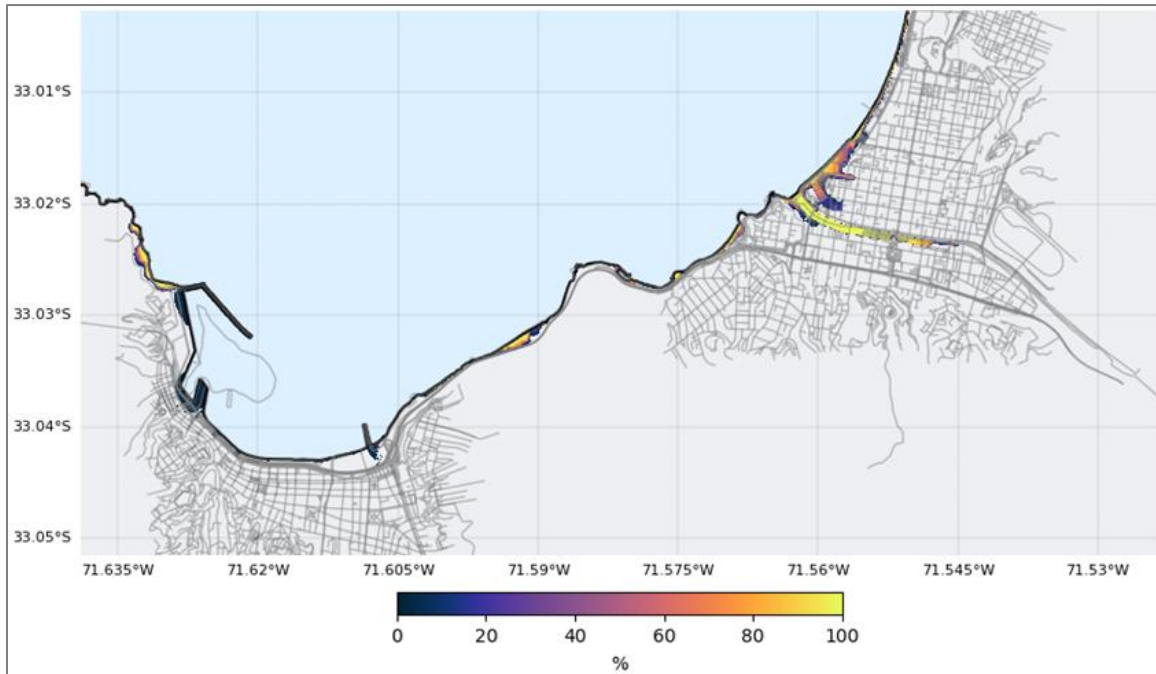


Figura 5.27 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio); (b) Desviación Estándar; (c) Máximos; (d) Mínimos. Intervalo 24-25%.

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 5.28 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 24-25%. Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 5.29, el intervalo 25-26% se encuentra en el límite norte de la IV Región, a una distancia de 358 kilómetros de Viña del Mar. Su deslizamiento promedio máximo se localiza en el continente, en la zona más profunda de la zona de subducción. Al examinar la desviación estándar y los deslizamientos máximos de los escenarios de este intervalo, se evidencia un sesgo particular en la ubicación del deslizamiento promedio máximo en la latitud 30°S, donde un escenario específico concentra deslizamientos de 47.6 metros. Además, se nota una marcada desviación estándar frente a la costa de la IV Región, que se extiende hacia el norte, especialmente en la zona menos profunda de la falla. También se identifica una franja de valores altos en la zona más profunda, desde la VI Región hacia el norte. Esto último sugiere la existencia de escenarios que abarcan todo el rango de profundidades de la interacción interplaca y que generan sus deslizamientos más significativos en la zona más profunda. Por otro lado, en el escenario promedio representativo, la desviación estándar y los valores máximos revelan una uniformidad en los deslizamientos al sur de la latitud 32°S, indicando que la falla de los sismos originados al norte de esta latitud se extiende hasta este tramo.

Estos escenarios provocan inundaciones, como las que se muestran en la Figura 5.30, concentradas en el sector de Av. Perú y Plaza Colombia en Viña del Mar.

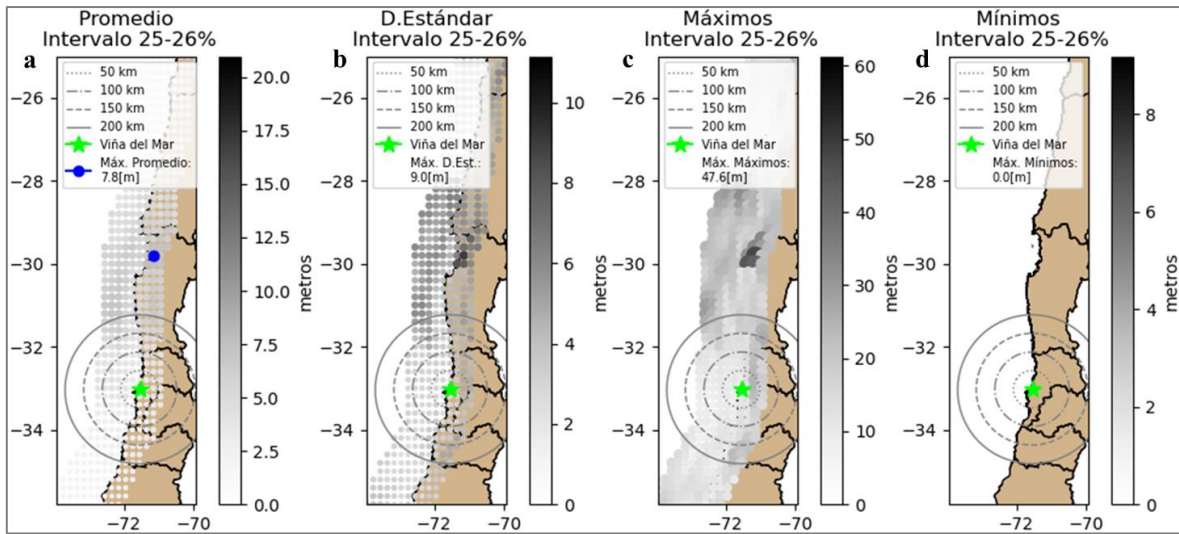


Figura 5.29 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio); (b) Desviación Estándar; (c) Máximos; (d) Mínimos. Intervalo 25-26%.

Fuente: Elaboración propia.

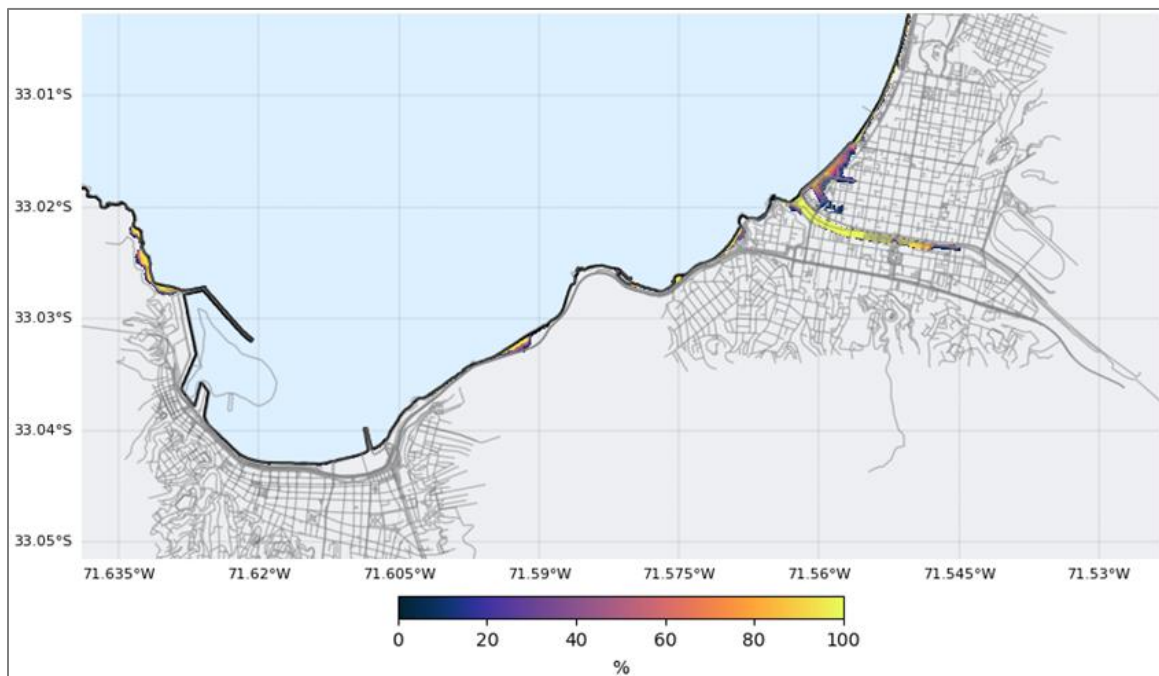


Figura 5.30 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar. Intervalo 25-26%.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.3 Magnitudes que predominan en eventos tsunamigénicos para Valparaíso-Viña del Mar

Después de identificar los deslizamientos máximos y su ubicación, se realiza un análisis del porcentaje de participación de cada magnitud en los escenarios que conforman el primer 30% de los datos. Este análisis se lleva a cabo en intervalos representativos del 10%, lo que implica un total de 280 escenarios, como se ilustra en la Figura 5.31. Además, con el objetivo de obtener una visión más detallada, se repite el procedimiento para el primer 10%, considerando intervalos de 1% que abarcan 28 escenarios, tal como se muestra en la Figura 5.32.

Al observar la Figura 5.31, se aprecia que todo el espectro de magnitudes está presente en el tramo más vulnerable para Valparaíso-Viña del Mar. Aunque las magnitudes mayores predominan en los eventos más críticos, las magnitudes menores también están presentes en menor proporción. Esto lleva a la conclusión de que los tsunamis de gran envergadura no dependen exclusivamente de las magnitudes más altas, ya que las magnitudes más bajas también desempeñan un papel significativo. Para un análisis más detallado, en la Figura 5.32, se observan magnitudes inferiores a Mw 9.0 a partir del intervalo 0-1%, con un par de escenarios de magnitud Mw 8.8 y Mw 8.9, en particular la magnitud Mw 8.6, que es la más baja del espectro, se hace presente desde el intervalo 2-3%, donde ya se ha presentado el tipo de inundación que genera este rango de escenarios.

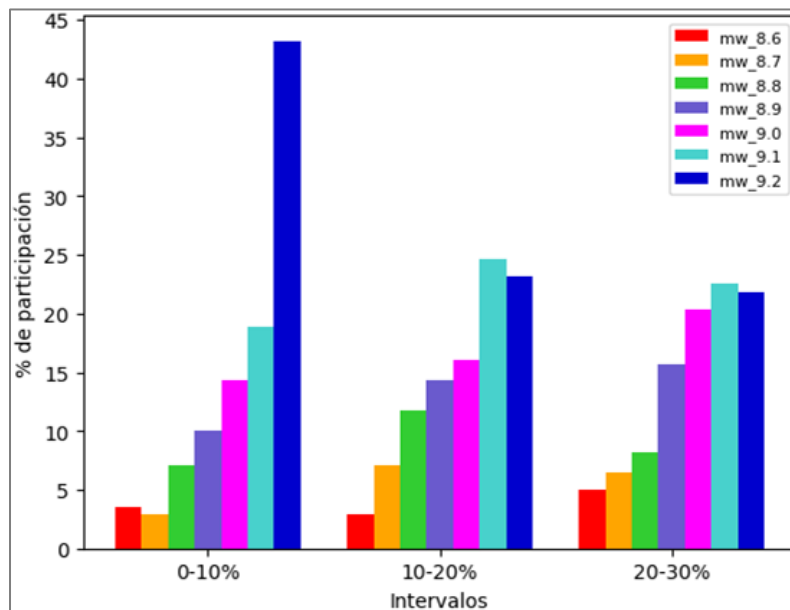


Figura 5.31 Porcentaje de participación de cada magnitud en intervalos de 10%.  
Fuente: Elaboración propia.

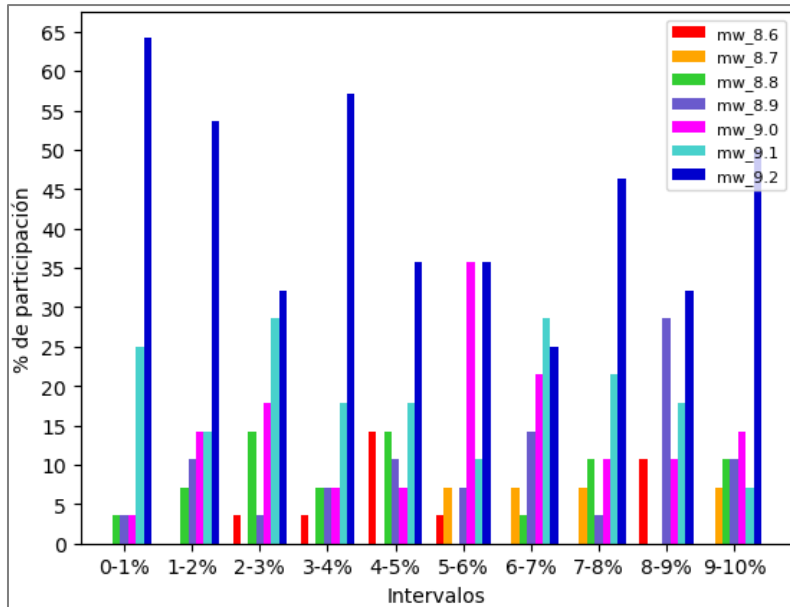


Figura 5.32 Porcentaje de participación de cada magnitud en intervalos de 1%.  
Fuente: Elaboración propia.

Con el propósito de ejemplificar el comportamiento de escenarios críticos cuya magnitud sísmica se encuentra en la mitad inferior del espectro abarcado por la base de datos, la Figura 5.33 presenta en su totalidad los deslizamientos cosísmicos de los escenarios con una magnitud de Mw 8.6 que forman parte del primer 10% de la base de datos. De estos escenarios, se observa una tendencia a concentrar los deslizamientos más significativos frente a la costa de la V Región, en la zona menos profunda de la zona de subducción.

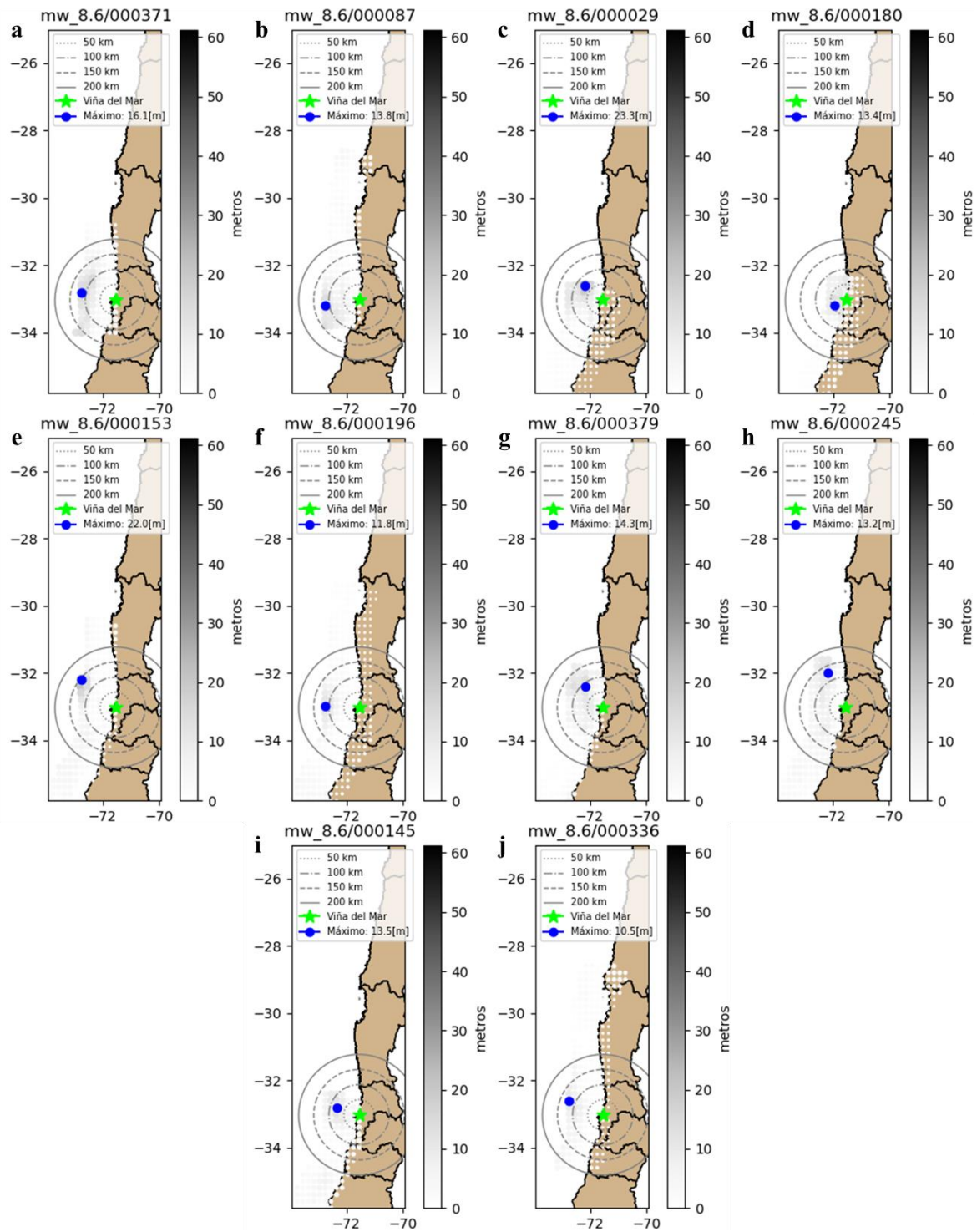


Figura 5.33 Escenarios de magnitud Mw 8.6 de intervalo 0-10%. (a) intervalo 2-3%; (b) intervalo 3-4%; (c-f) intervalo 4-5%; (g) intervalo 5-6%; (h-j) intervalo 8-9%.

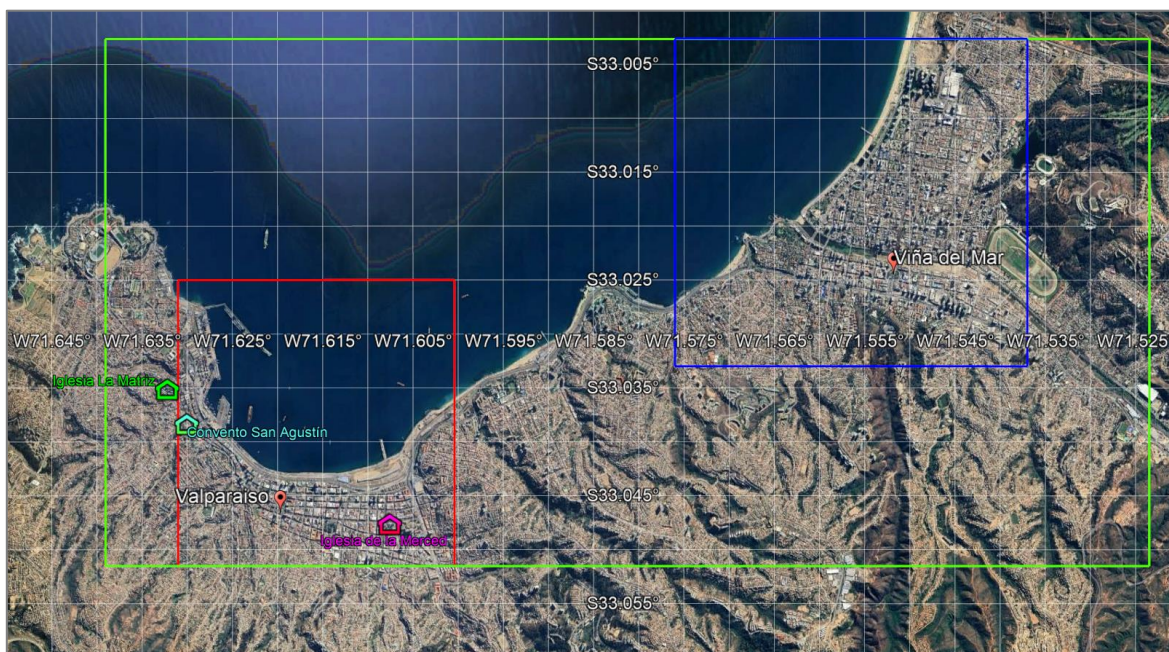
Fuente: Elaboración propia.

## 5.2 Escenarios que se aproximan al tsunami de 1730

En base a lo expuesto por Carvajal *et al.* (2017b), que se detallan en la sección 2.2.1 de este documento, el tsunami desencadenado por el terremoto de 1730 en Valparaíso tuvo un impacto considerable, generando inundaciones que afectaron también a la localidad de Penco e incluso alcanzaron Japón. En Valparaíso, el registro histórico de áreas afectadas incluye a la Iglesia de la Merced, llegando hasta el Convento San Agustín y alcanzando las escaleras de la Iglesia La Matriz (ver Figura 5.34). De acuerdo con estimaciones, la magnitud del terremoto se situaría en un rango de Mw 9.1-9.3, y el deslizamiento cosísmico promedio se estima entre 10-14 metros, con valores máximos que oscilan entre 20-28 metros.

En la actualidad, la ubicación de la Iglesia de la Merced está ocupada por el Colegio San Pedro Nolasco, y el antiguo Convento San Agustín ha sido reemplazado por el Tribunal de Justicia.

A continuación, el análisis se limita a la base de datos disponible, al área que esta abarca y a la topografía actual para obtener una aproximación al tsunami de 1730.



*Figura 5.34 Ubicación de sitios históricos: Iglesia La Matriz, Convento San Agustín e Iglesia De La Merced.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.2.1 Determinación del porcentaje de escenarios significativos para el análisis

Con la base de datos jerarquizada, se han identificado los escenarios que provocan una inundación similar a la del tsunami de 1730. El criterio empleado se basa en seguir el orden predefinido en la sublocalidad de Valparaíso, representado por la curva roja en la Figura 5.35,

y asegurarse de que la inundación alcance o supere al menos la ubicación de la Iglesia De La Merced y/o el Convento San Agustín. Las coordenadas exactas utilizadas son las siguientes:  $-33.048783^\circ$  de latitud y  $-71.607495^\circ$  de longitud para la Iglesia De La Merced, y  $-33.039379^\circ$  de latitud y  $-71.629718^\circ$  de longitud para el Convento San Agustín.

En color naranja, se han identificado los escenarios que cumplen con este criterio, lo que representa un 3.15% de los casos. Para mantener coherencia con la metodología utilizada en pasos anteriores, se ha decidido aproximar el porcentaje a analizar al 3%. Es importante destacar que este 3% de los escenarios inunda Valparaíso, como mínimo, un área de 138.4 hectáreas.

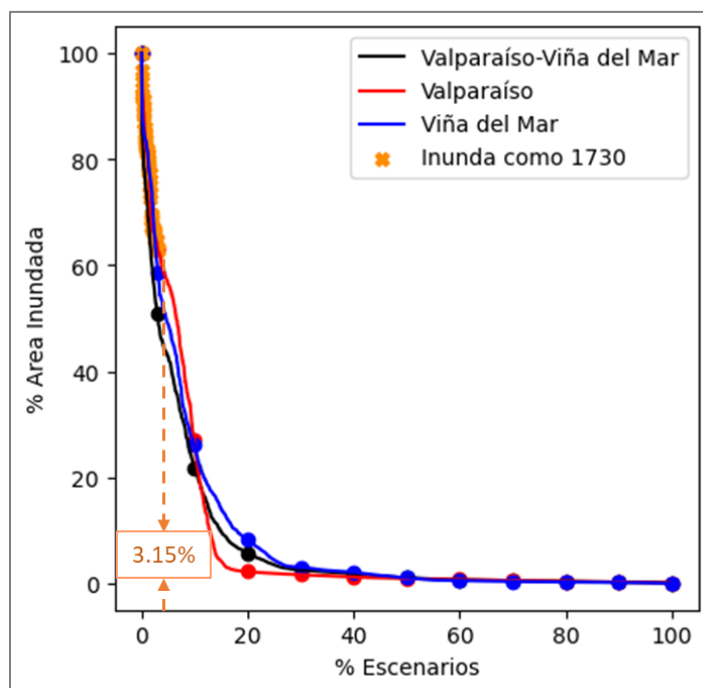


Figura 5.35 Porcentaje de área inundada por tsunami versus el porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso como 1730 (naranja).

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.36, se presenta una vista en planta del área inundada y el porcentaje de participación de los escenarios que componen el subconjunto responsable de la inundación en Valparaíso, similar a lo que ocurrió en 1730. Se pueden apreciar similitudes entre el área inundada en amarillo, que representa el 100% de los escenarios, y el área de inundación estimada por Carvajal et al. (2017b), tal como se muestra en la Figura 5.37.

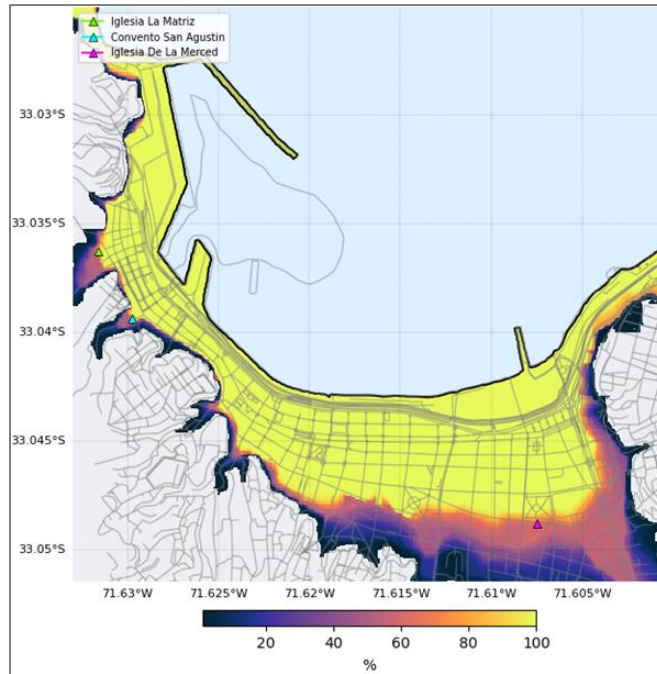


Figura 5.36 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso como en 1730.  
Fuente: Elaboración propia.

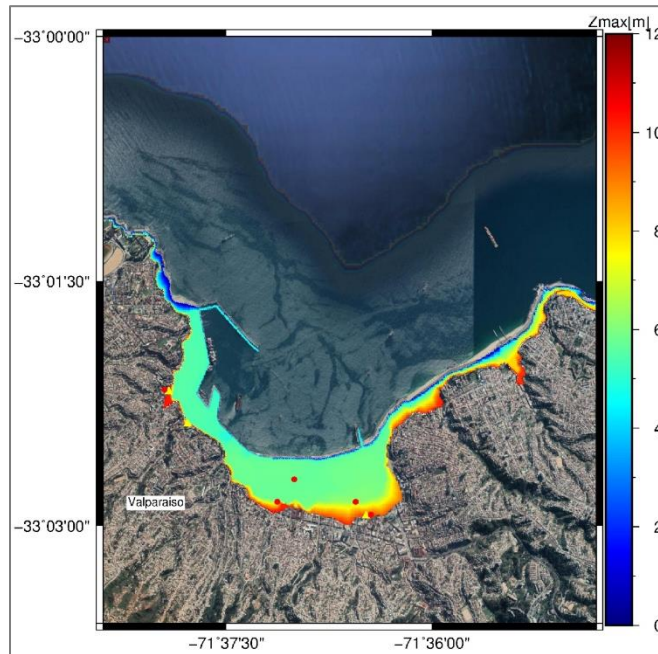
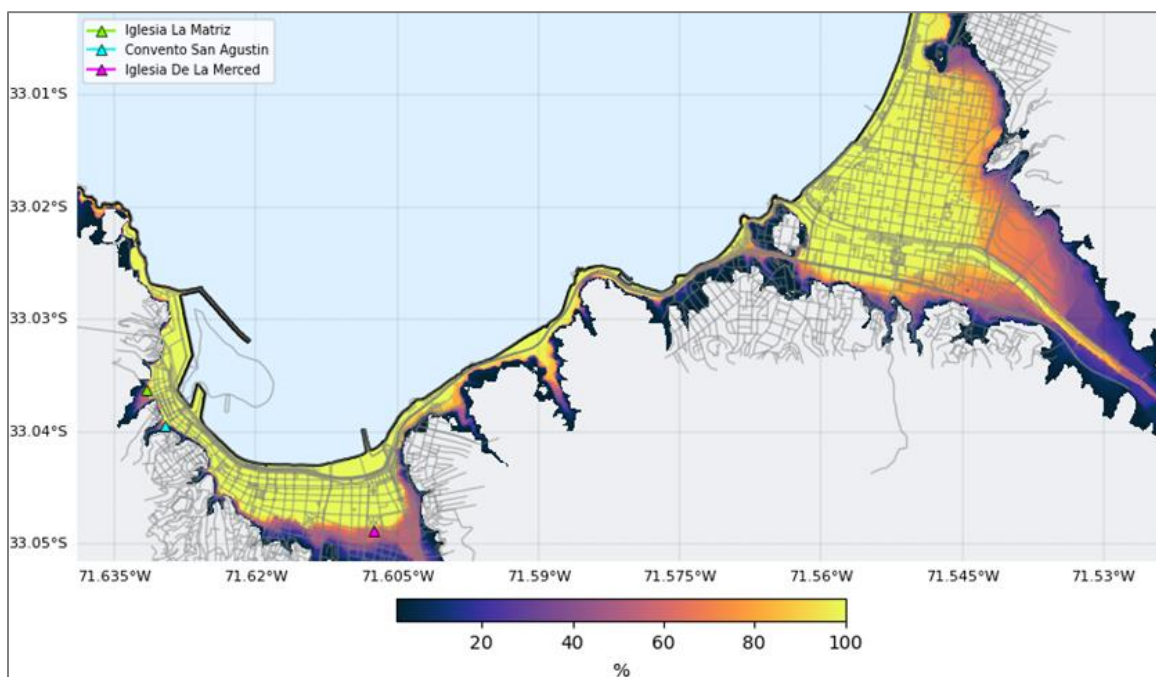


Figura 5.37 Alturas máximas de olas resultantes en Valparaíso. Basada en condiciones iniciales de Carvajal et al. (2017b)).  
Fuente: Zamora et al. (2020)

La Figura 5.38 muestra una vista en planta del área inundada y el porcentaje de participación de los escenarios que componen el subconjunto que recrea la inundación de 1730. Esta representación se extiende a lo largo de toda la extensión de la localidad Valparaíso-Viña del Mar. Es evidente que el área inundada por el 100% de los escenarios llega aproximadamente hasta la Calle 7 Oriente. En cuanto al dominio correspondiente a Viña del Mar, es importante destacar que el 100% de estos escenarios inunda al menos 269.3 hectáreas.



*Figura 5.38 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar como en 1730.*

## 5.2.2 Análisis de los deslizamientos cosísmicos

Siguiendo el procedimiento detallado en la sección 4.3, se procede a la agrupación de los escenarios en subconjuntos, los cuales se componen a partir de intervalos del 1% de la base de datos. En este contexto, se generan 3 subconjuntos, cada uno conformado por 28 escenarios. La Figura 5.39, de acuerdo con esta metodología, presenta la distribución de todos los deslizamientos máximos representativos alrededor de Viña del Mar. Estos puntos se encuentran en un rango de latitudes entre 32°S y 33°S, situados dentro del área correspondiente a la brecha sísmica de Valparaíso. Además, están ubicados en la zona menos profunda de la interacción interplaca, lo que respalda la potencial magnitud de los tsunamis asociados.

En la Tabla 5.5 se proporcionan los detalles específicos de cada punto. Se destaca que los deslizamientos promedio máximos están ordenados en su mayoría de mayor a menor, con magnitudes que varían entre 20.5 y 12.3 metros. Estas magnitudes se encuentran dentro del rango de deslizamientos cosísmicos registrados en eventos pasados, como los terremotos de Valdivia en 1960 y del Maule en 2010 (ver Figura 2.6 y Tabla 2.1).

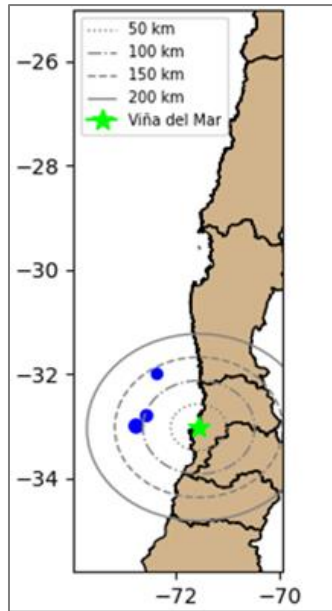


Figura 5.39 Distribución de deslizamientos máximos representativos del 3% que inunda Valparaíso como en 1730.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.5 Resumen de deslizamientos representativos para intervalos que inundan Valparaíso como en 1730.

Fuente: Elaboración propia.

Intervalo	Deslizamiento promedio máximo [m]	Ubicación		Distancia a Viña del Mar [Km]			Valor Máximo de:		
		Longitud	Latitud	Radial	Este-Oeste	Sur-Norte	Desviación Estándar	Máximos	Mínimos
0-1%	20.5	-72.749	-33.0	111.98	111.97	-0.64	11.2	61.3	9.2
1-2%	14.6	-72.549	-32.8	96.61	94.02	22.20	9.2	39.6	0.0
2-3%	12.3	-72.349	-32.0	136.16	78.07	111.56	9.2	43.0	2.4

### Análisis de intervalos específicos

En la Figura 5.40, el intervalo 0-1%, caracterizado por la concentración de deslizamientos promedio representativos con los valores más elevados, se encuentra frente a la costa de la V Región, especialmente en la zona cercana a la Fosa Perú-Chile, abarcando una extensión que va desde la latitud 30°S hacia el sur. Al analizar la desviación estándar y los valores máximos de los escenarios que componen este intervalo, se observa una zona relativamente uniforme entre las latitudes 30°S y 34°S, lo que indica la tendencia de los sismos de este subconjunto a originarse en esta brecha sísmica. Esto se respalda con la concentración de deslizamientos cosísmicos mínimos frente a Viña del Mar, lo que sugiere que, independientemente del origen de los sismos que conforman este intervalo, todos convergen en esta zona, un detalle que no se observa en el resto de los escenarios analizados anteriormente. También se identifica una

zona con valores más altos de deslizamiento al sur de la latitud 34°S y otra, aunque menos intensa, al norte de la latitud 30°S. La Figura 5.41 ilustra la inundación asociada a este subconjunto y al porcentaje de escenarios que inundan el área designada, superando considerablemente la ubicación de los sitios históricos en Valparaíso y afectando incluso el sector de Sporting en Viña del Mar.

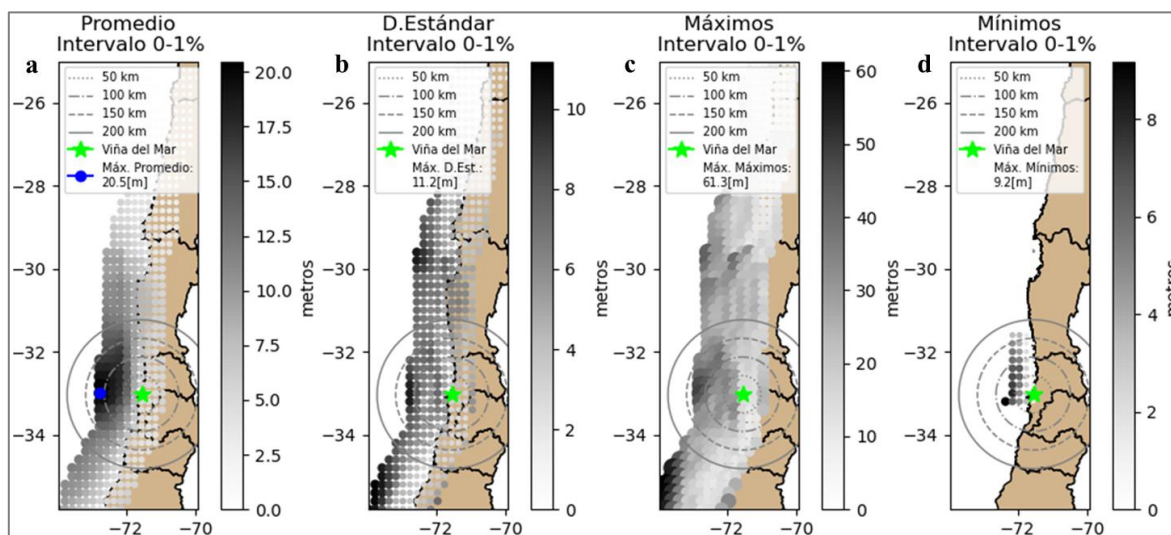
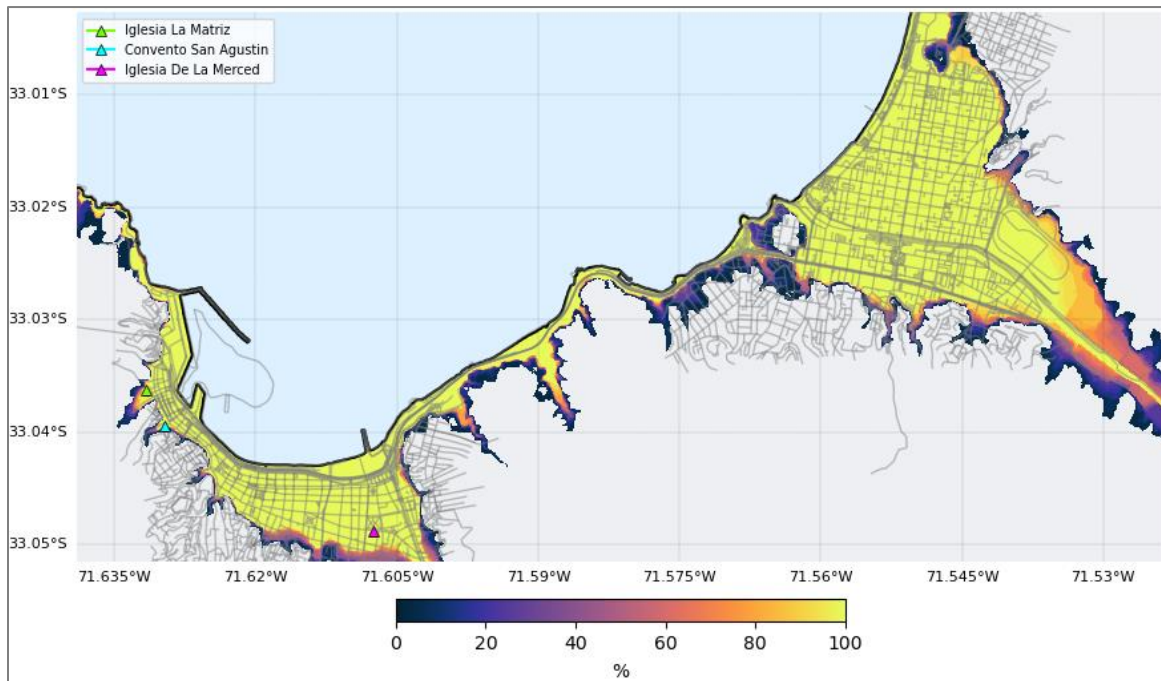


Figura 5.40 (a) Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 0-1%.  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 5.41 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar como en 1730. Intervalo 0-1%.  
Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 5.42, el intervalo 1-2%, caracterizado por la concentración de deslizamientos promedio representativos con valores más elevados, se encuentra entre la costa de la V Región y la Fosa Perú-Chile, abarcando una extensión desde la latitud 30°S hasta la latitud 33.5°S. Esta concentración se repite en la desviación estándar y en los deslizamientos máximos que conforman este intervalo, indicando la presencia de sismos con deslizamientos no tan dispares como en el intervalo anterior, pero con un origen recurrente en las cercanías de la V Región. La Figura 5.43 muestra la inundación asociada a este subconjunto y al porcentaje de escenarios que afectan el área designada, superando la ubicación de los sitios históricos en Valparaíso y alcanzando la Calle 7 Oriente en Viña del Mar en un 100%.

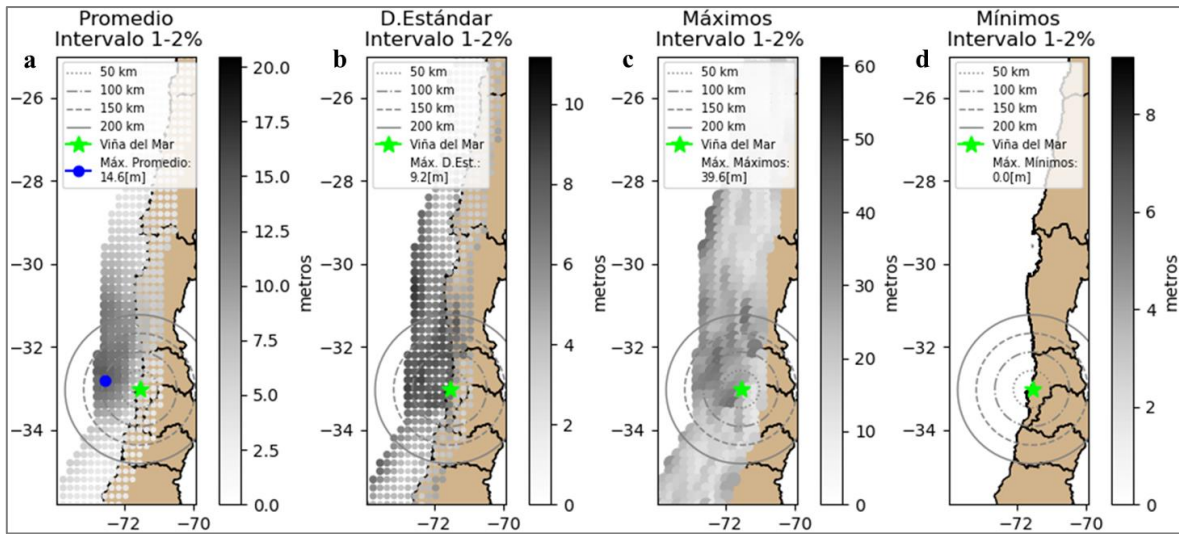


Figura 5.42 Deslizamiento Representativo (Promedio); (b) Desviación Estándar; (c) Máximos; (d) Mínimos. Intervalo 1-2%.  
Fuente: Elaboración propia.

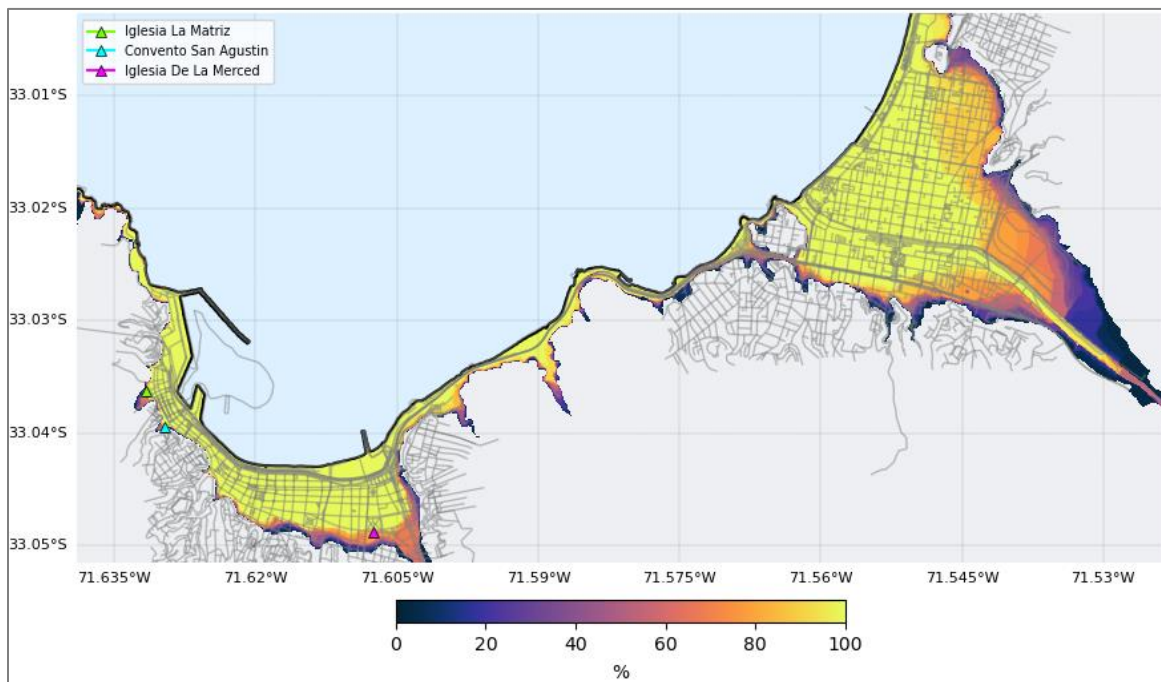


Figura 5.43 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar como en 1730. Intervalo 1-2%.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.44, el intervalo 2-3% se caracteriza por la concentración de deslizamientos promedio representativos con los valores más altos, abarcando la zona entre la costa de la IV y V Región y la Fosa Perú-Chile, en un rango que se extiende desde la latitud 30°S hasta la latitud 34°S. En lo que respecta a la desviación estándar y los valores máximos

que conforman este intervalo, se observa una distribución relativamente uniforme, con la excepción de una concentración de valores más altos al norte de la latitud 31°S. Esto sugiere una concentración de sismos originados frente a las costas de la V Región y otros eventos con deslizamientos mayores dispersos al norte de la latitud 31°S. La Figura 5.45 muestra la inundación asociada a este subconjunto y el porcentaje de escenarios que afectan el área designada, llegando hasta la ubicación de los sitios históricos en Valparaíso y alcanzando el 100% de inundación en Calle 7 Oriente en Viña del Mar.

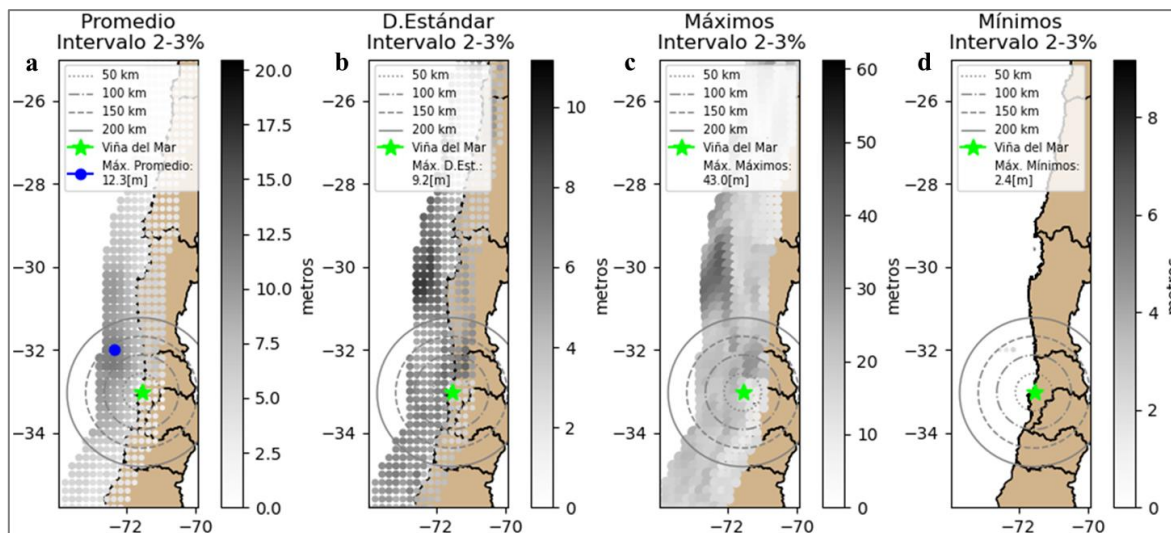


Figura 5.44 Deslizamiento Representativo (Promedio);(b) Desviación Estándar; (c)Máximos; (d)Mínimos. Intervalo 2-3%.  
Fuente: Elaboración propia.

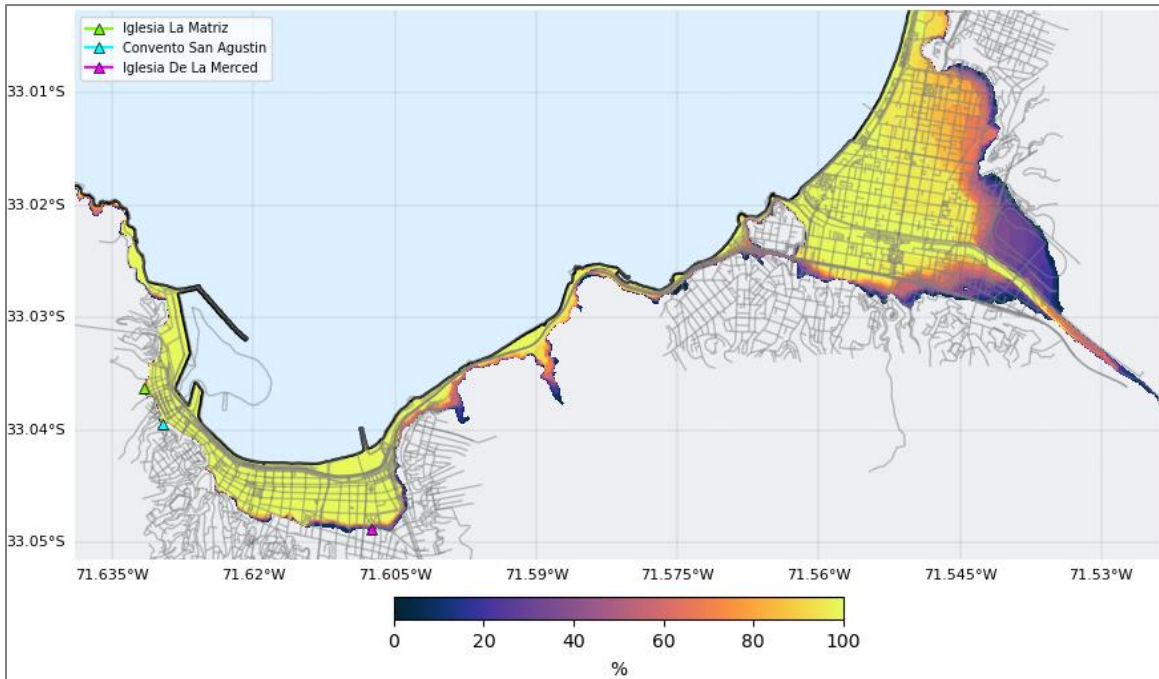


Figura 5.45 Vista en planta del porcentaje de escenarios que inundan Valparaíso-Viña del Mar como en 1730. Intervalo 2-3%.  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3 Magnitudes que predominan en eventos que inundan Valparaíso como 1730

Se realiza un análisis del porcentaje de contribución de cada magnitud en los escenarios que representan el 3% de los datos. A pesar de que en los eventos más críticos predominan magnitudes mayores, se identifican varios escenarios con magnitudes inferiores a las estimadas por Carvajal et al. (2017b). Esto sugiere la posibilidad de que en la región de Valparaíso-Viña del Mar puedan ocurrir inundaciones similares al evento de 1730, incluso con sismos de menor magnitud de lo estimado (ver Figura 5.46).

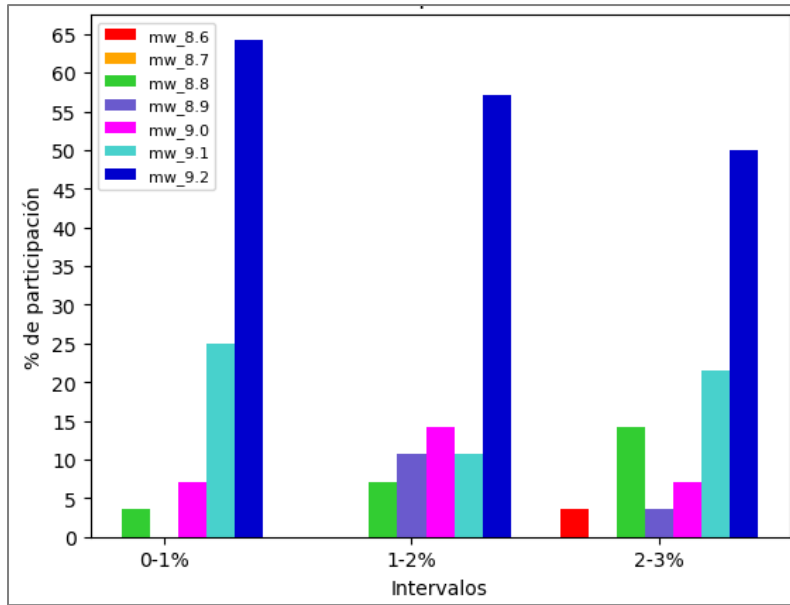


Figura 5.46 Porcentaje de participación de cada magnitud en intervalos de 1%.  
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en las Figura 5.47 y Figura 5.48 se muestra la distribución de los deslizamientos cosísmicos correspondientes a escenarios con magnitudes inferiores a Mw 9.0, indicando a qué intervalo pertenecen. En todos los escenarios, se observa una concentración de deslizamientos significativos en la zona poco profunda de la interacción interplaca, frente a la costa de la V Región.

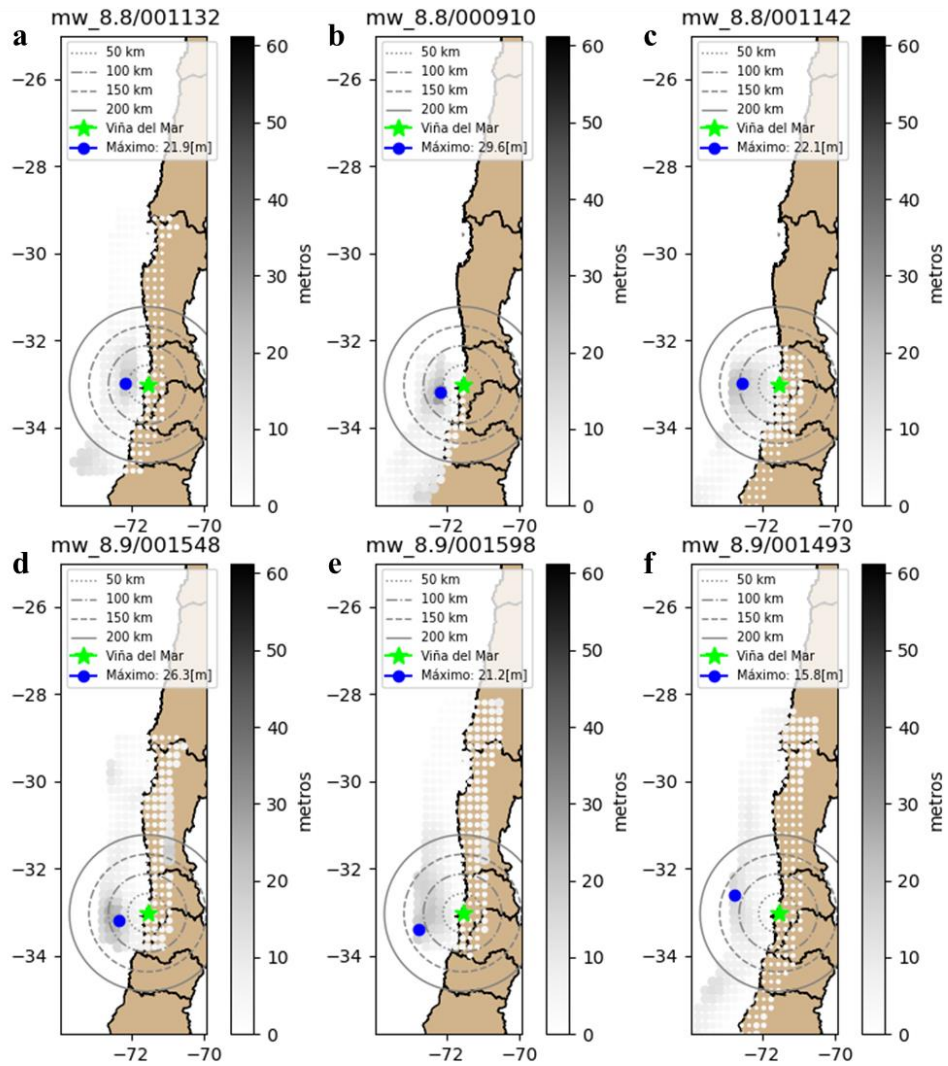


Figura 5.47 Escenarios de magnitud menor a Mw 9.0. (a) intervalo 0-1%; (b-f) intervalo 1-2%.  
Fuente: Elaboración propia.

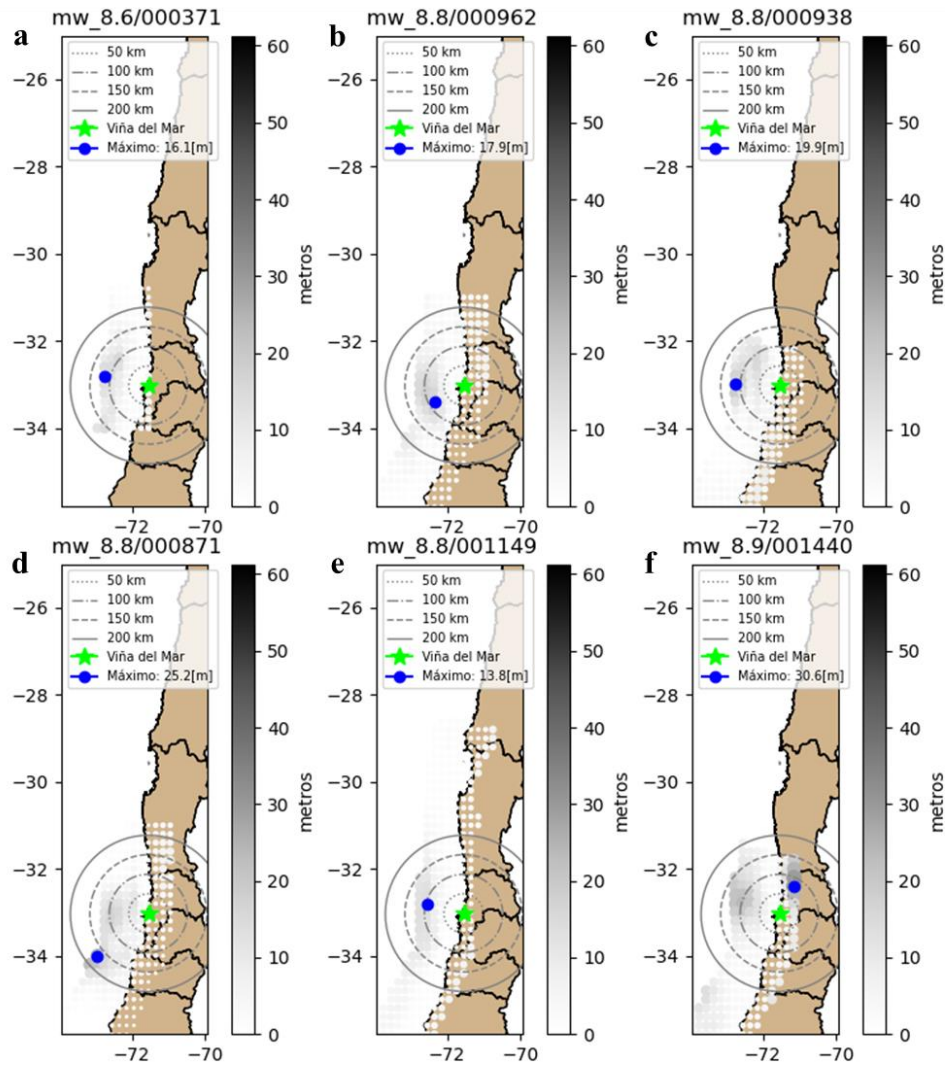


Figura 5.48 Escenarios de magnitud menor a Mw 9.0. (a-f) intervalo 2-3%.  
Fuente: Elaboración propia.

## 6 Conclusiones

En base a los datos analizados, se puede concluir que Viña del Mar se muestra como una localidad más vulnerable a tsunamis en comparación con Valparaíso. Esto se debe principalmente a las diferencias en la topografía y a la extensión de áreas llanas cercanas al nivel del mar en ambas ciudades. Los resultados muestran que un 30% de los escenarios generan inundaciones significativas en Viña del Mar, mientras que, en Valparaíso, menos del 20% de los escenarios superan la línea de costa. Específicamente, en Viña del Mar, el estero Marga Marga y Av. Perú destacan como zonas altamente susceptibles ante un tsunami.

En cuanto a la ubicación de los deslizamientos cosísmicos que desencadenan inundaciones importantes en Valparaíso-Viña del Mar, se observa una tendencia a la concentración de deslizamientos más significativos frente a las costas de la V Región, particularmente en zonas cercanas a la Fosa Perú-Chile. Sin embargo, se identifican dos casos excepcionales. Uno de ellos implica escenarios cuyos deslizamientos máximos se originan más lejos de la V Región, abarcando la zona menos profunda de la interacción interplaca de la V Región, comparables con el terremoto Mw 9.5 de Valdivia en 1960. El otro caso involucra sismos fuertes cuya extensión de falla no alcanza las costas de la V Región, pero debido a su intensidad, afectan la zona a causa de la propagación de olas. Estos dos casos son provocados por escenarios que desarrollan concentraciones de deslizamientos cosísmicos máximos que rondan los 30 metros. Estos resultados resaltan la importancia de la ubicación estratégica de los deslizamientos en la generación de tsunamis en esta área.

En relación con las magnitudes de los sismos y los deslizamientos cosísmicos, es importante destacar que, si bien los eventos críticos suelen estar asociados a magnitudes más altas, existe la posibilidad de que sismos de magnitudes menores a Mw 9.0 provoquen inundaciones similares. Esto es factible siempre que se produzca un deslizamiento cosísmico estratégicamente ubicado con una alta concentración frente a las costas de Valparaíso-Viña del Mar en la zona más somera de la interacción interplaca. El espectro de deslizamiento cosísmico necesario para desencadenar inundaciones comparables a las del primer 10% de los escenarios con magnitudes menores a Mw 9.0 oscila aproximadamente entre 10 y 20 metros, lo que puede compararse con el terremoto Mw 8.8 del Maule de 2010.

En lo que respecta a la aproximación al tsunami de 1730 con los escenarios disponibles, es fundamental reconocer las limitaciones del estudio, como la falta de consideración de cambios topográficos desde ese período y la focalización exclusiva en Valparaíso. A pesar de estas limitaciones, se logra reproducir inundaciones similares a las registradas en 1730 en un 3% de los escenarios analizados, incluyendo eventos de magnitud menor a Mw 9.0. Esto sugiere que la zona de Valparaíso-Viña del Mar podría ser vulnerable a tsunamis incluso con sismos de menor magnitud, siempre y cuando la distribución de deslizamiento cosísmico se concentre frente a las costas de la V Región en la zona más somera de la interacción interplaca.

Finalmente, se destaca que la metodología utilizada para analizar los deslizamientos cosísmicos, basada en escenarios representativos conforme al promedio de subconjuntos de

escenarios, ofrece una visión general del comportamiento, pero suaviza la magnitud de los deslizamientos y dificulta el análisis de escenarios atípicos. Se plantea la posibilidad de mejorar esta metodología en futuras investigaciones y abrir nuevas líneas de investigación en esta área focalizada en el origen de los deslizamientos cosísmicos para una inundación ya conocida en una localidad determinada.

## 7 Referencias

- Bernardín Sepúlveda, M. A. (2019). Origen del desplazamiento co-sísmico y post-sísmico para el terremoto de Tohoku Oki 2011. *Trabajo para optar al título de Geofísico de la Universidad de Concepción*.
- Bravo, F., Koch, P., Riquelme, S., Fuentes, M., & Campos, J. (2019). Slip Distribution of the 1985 Valparaíso Earthquake Constrained with Seismic and Deformation Data. *Seismological Research Letters*. doi:10.1785/0220180396
- Carvajal, M., Cisternas, M., & Catalán, P. A. (2017b). Source of the 1730 Chilean earthquake from historical records: Implications for the future tsunami hazard on the coast of Metropolitan Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1002/2017JB014063
- Carvajal, M., Cisternas, M., Gubler, A., Catalán, P., Winckler, P., & Wesson, R. (2017a). Reexamination of the magnitudes for the 1906 and 1922 Chilean earthquakes using Japanese tsunami amplitudes: Implications for source depth constraints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1002/2016JB013269
- Dura, T., Cisternas, M., Horton, B. P., Ely, L. L., Nelson, A. R., Wesson, R. L., & Pilarczyk, J. E. (2015). Coastal evidence for Holocene subduction-zone earthquakes and tsunamis in central Chile. *Quaternary Science Reviews*. doi:10.1016/j.quascirev.2014.10.015
- Klein, E., Métois, M., Meneses, G., Vigny, C., & Delorme, A. (2018). Bridging the gap between North and Central Chile: insight from new GPS data on coupling complexities and the Andean sliver motion. *Geophysical Journal International*. doi:10.1093/gji/ggy094
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Koper, K. D., Hutko, A. R., Ye, L., . . . Rushing, T. M. (2012). Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1029/2011JB009133
- Li, S., Moreno, M., Bedford, J., Rosenau, M., & Oncken, O. (2015). Revisiting viscoelastic effects on interseismic deformation and locking degree: A case study of the Peru-North Chile subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1002/2015JB011903
- Lomnitz, C. (2004). Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters*. doi:10.1785/gssrl.75.3.368
- Melnick, D. (2016). Rise of the central Andean coast by earthquakes straddling the Moho. *Nature Geoscience*. doi:10.1038/ngeo2683

- Métois, M., Socquet, A., & Vigny, C. (2012). Interseismic coupling, segmentation and mechanical behavior of the central Chile subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1029/2011JB008736
- Métois, M., Vigny, C., & Socquet, A. (2016). Interseismic Coupling, Megathrust Earthquakes and Seismic Swarms Along the Chilean Subduction Zone (38°–18°S). *Pure and Applied Geophysics*. doi:10.1007/s00024-016-1280-5
- Molina, D., Tassara, A., Abarca, R., Melnick, D., & Madella, A. (2021). Frictional Segmentation of the Chilean Megathrust From a Multivariate Analysis of Geophysical, Geological, and Geodetic Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1029/2020JB020647
- Moreno, M. S., Bolte, J., Klotz, J., & Melnick, D. (2009). Impact of megathrust geometry on inversion of coseismic slip from geodetic data: Application to the 1960 Chile earthquake. *Geophysical Research Letters*. doi:10.1029/2009GL039276
- Moreno, M., Melnick, D., Rosenau, M., Baez, J., Klotz, J., Oncken, O., . . . Hase, H. (2012). Toward understanding tectonic control on the Mw 8.8 2010 Maule Chile earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*. doi:10.1016/j.epsl.2012.01.006
- Ruegg, J. C., Campos, J., Armijo, R., Barrientos, S., Briole, P., Thiele, R., . . . Serrurier, L. (1996). The MW=8.1 Antofagasta (North Chile) Earthquake of July 30, 1995: First results from teleseismic and geodetic data. *Geophysical Research Letters*. doi:10.1029/96GL01026
- Ruegg, J. C., Olcay, M., & Lazo, D. (2001). Co-, Post- and Pre(?) -seismic Displacements Associated with the Mw 8.4 Southern Peru Earthquake of 23 June 2001 from Continuous GPS Measurements. *Seismological Research Letters*. doi:10.1785/gssrl.72.6.673
- Ruiz, S., Klein, E., Campo, F. D., Rivera, E., Poli, P., Métois, M., . . . Madaria, R. &. (2016). The Seismic Sequence of the 16 September 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile, Earthquake. *Seismological Research Letters*. doi:10.1785/0220150281
- Schurr, B., Asch, G., Hainzl, S., Bedford, J., Hoechner, A., Palo, M., . . . Vilotte, J. (2014). Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. *Nature*. doi:10.1038/nature13681
- Schurr, B., Asch, G., Rosenau, M., Wang, R., Oncken, O., Barrientos, S., & Vilotte, J. (2012). The 2007 M7.7 Tocopilla northern Chile earthquake sequence: Implications for along-strike and downdip rupture segmentation and megathrust frictional behavior. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1029/2011JB009030
- Sepúlveda, I., Liu, P. L.-F., & Grigoriu, M. (2018). Probabilistic Tsunami Hazard Assessment in South China Sea With Consideration of Uncertain Earthquake

Characteristics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1029/2018JB016620

- Sepúlveda, I., Liu, P. L.-F., Grigoriu, M., & Pritchard, M. (2017). Tsunami hazard assessments with consideration of uncertain earthquake slip distribution and location. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1002/2017JB014430
- Tilmann, F., Zhang, Y., Moreno, M., Saul, J., Eckelmann, F., Palo, M., . . . Dahm, T. (2016). The 2015 Illapel earthquake, central Chile: A type case for a characteristic earthquake? *Geophysical Research Letters*. doi:10.1002/2015GL066963
- Vigny, C., & Klein, E. (2022). The 1877 megathrust earthquake of North Chile two times smaller than thought? A review of ancient articles. *Journal of South American Earth Sciences*. doi:10.1016/j.jsames.2022.103878
- Vigny, C., Socquet, A., Peyrat, S., Ruegg, J. C., Metois, M., Madariaga, R., . . . Kendrick, E. (2011). The 2010 Mw 8.8 Maule Megathrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS. *Science*. doi:10.1126/science.1204132
- Zamora, N., Catalán, P., Gubler, A., & Carvajal, M. (2021). Microzoning Tsunami Hazard by Combining Flow Depths and Arrival Times. *Frontiers Earth Sci*. doi:10.3389/feart.2020.591514
- Zamora, N., Gubler, A., Orellana, V., León, J., Urrutia, A., Carvajal, M., . . . Bertin, C. (2020). The 1730 Great Metropolitan Chile Earthquake and Tsunami Commemoration: Joint Efforts to Increase the Country's Awareness. *Geosciences*. doi:10.3390/geosciences10060246