



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Influencia de la fuente tsunamigénica en el comportamiento de tsunamis en bahías no resonantes

Memoria de Título presentada por

Álvaro Alexis Rojas Castillo

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Patricio Andrés Catalán Mondaca

Mayo de 2024



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

Influencia de la fuente tsunamigénica en el comportamiento de tsunamis en bahías no resonantes

AUTOR:

Álvaro Alexis Rojas Castillo

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

Nombre

Firma

Prof. Guía

Miembro 1 Comisión

Miembro 2 Comisión

Valparaíso, Chile, Mayo de 2024

Resumen

Por medio de la simulación de tsunamis se ha evidenciado que las costas de Chile presentan características resonantes o no resonantes según sea la bahía de estudio. A partir de la caracterización de estas bahías se han ido agregando nuevas incógnitas al fenómeno de la respuesta resonante de los tsunamis, una de ellas es la influencia de fuente tsunamigénica en el comportamiento de tsunamis en bahías no resonantes, donde la batimetría genera un bajo aporte a la respuesta espectral de la bahía. El presente trabajo utiliza resultados de simulaciones previas y a partir de una metodología de desagregación de datos busca clasificar escenarios y encontrar patrones de comportamiento entre las características del sismo tsunamigénico y los tsunamis más y menos energéticos en las bahías de estudio, correspondientes a Valparaíso y San Antonio. La investigación cuenta con 350 escenarios subdivididos en 7 grupos de distinta magnitud (M_w 8.6- M_w 9.2) los cuales serán clasificados bajo un criterio del área bajo la curva estimada a partir de los espectros del tsunami, de igual forma se analizarán las características de los sismos utilizados en las simulaciones con el objetivo de encontrar un patrón de comportamiento específicamente en la fuente. Adicionalmente se estimará la función de aporte batimétrico en el tsunami para corroborar los comportamiento resonantes y no resonantes de las bahías de estudio, para ello en el análisis se agregarán las bahías de Los Vilos y Coquimbo con fines de comparar los distintos comportamientos de las bahías.

Los resultados obtenidos corroboran el bajo aporte espectral de la batimetría en las bahías no resonantes. Además se indica que existe una relación directa entre el comportamiento energético del sismo y los tsunamis en las bahías no resonantes, adicionalmente por medio del ordenamiento de escenarios se obtiene que para las bahías de San Antonio y Valparaíso existe una zona específica donde están los sismos que generan los tsunamis más energéticos, evidenciando que la ubicación del centroide de deformaciones del sismo es un factor relevante para estas bahías de estudio.

Contenido

1	Introducción	5
2	Estado de Arte.....	6
2.1	Resonancia en Tsunamis.....	6
2.2	Influencia de la batimetría en tsunamis	6
2.3	Influencia de la fuente en tsunamis	7
2.4	Espectro de fondo.....	8
2.5	Resonancia de bahías en Chile.....	9
2.6	Definición del problema	10
3	Objetivos.....	11
3.1	Objetivo General	11
3.2	Objetivos específicos.....	11
4	Metodología	12
4.1	Proceso metodológico.....	12
4.2	Análisis espectral del tsunami en costa.	13
4.3	Análisis de la fuente tsunamigénica	13
4.4	Relación entre fuente y tsunami	15
5	Resultados	16
5.1	Análisis de fuente tsunamigénica.....	16
5.1.1	Clasificación de Escenarios.....	16
5.2	Análisis Espectral del tsunami en costa.....	18
5.2.1	Clasificación Valparaíso	19
5.2.2	Clasificación San Antonio.....	20
5.3	Influencia de la batimetría	21
6	Discusión	23
6.1	Influencia de la fuente en las bahías de Valparaíso y San Antonio	23
6.2	Análisis de la fuente tsunamigénica	23
6.3	Relación fuente vs tsunami	26
6.3.1	Valparaíso.....	26
6.3.2	San Antonio.....	29
7	Conclusiones	34
8	Referencias.....	35
9	Anexos	36
9.1	Análisis de Fuente	36
9.2	Análisis de Tsunamis.....	39
9.3	Influencia de la batimetría	43
9.4	Análisis de la fuente Tsunamigénica.....	53
9.5	Análisis bahía de Valparaíso.....	60
9.6	Análisis bahía de San Antonio	62

1 Introducción

Chile se ubica en la zona denominada cinturón de fuego del Pacífico, un área caracterizada por su intensa actividad sísmica y volcánica, debido a la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana. La convergencia de estas placas tectónicas genera una alta frecuencia de eventos sísmicos en el país y en consecuencia, en ciertas ocasiones la generación de tsunamis, un evento de alto riesgo para el país debido a la alta cantidad de ciudades y localidades costeras.

Un tsunami se define como olas de períodos desde los 5 a 60 minutos de ocurrencia natural que resultan de una perturbación a gran escala de una masa de agua, que puede ser causada por terremotos, como también por movimientos de material, impactos o erupciones volcánicas en el mar. Respecto a los antecedentes de este tipo de eventos, en el pasado se ha demostrado que los tsunamis pueden ser catastróficos, como en el caso de Maule 2010 (M_w 8.8), Pisagua 2014 (M_w 8.2) o Illapel 2015 (M_w 8.3). En los eventos señalados se destaca que una de las grandes problemáticas fue la falta de entendimiento y concepción del fenómeno, por lo que las medidas de mitigación, contención y evacuación no eran las óptimas y más eficientes, lo cual aumenta considerablemente el daño que se puede generar ante este tipo de evento. Esto se evidenció principalmente en el tsunami del 27 de Febrero del 2010 donde autoridades tomaron decisiones incorrectas descartando la evacuación de localidades, generando pérdidas humanas y materiales significativas.

Desde los eventos ocurridos el 2010 las investigaciones respecto a los tsunamis en Chile han aumentado, con tal de obtener mayor conocimiento del fenómeno y con ello mejorar las medidas de mitigación para estas catástrofes, pero pese a los avances de los últimos años sigue existiendo un nivel de incertidumbre en ciertos fenómenos presentes en los tsunamis, como el señalado por Yamazaki & Cheung (2011) donde indican que la ola más destructiva en Talcahuano en el terremoto del 2010 llegó tres horas después del evento sísmico. Otro ejemplo es el caso del terremoto de Pisagua (2014) donde las ciudades de Arica e Iquique, pese a experimentar un sismo similar, presentaron comportamientos de tsunamis diferentes y a partir de un estudio de ambas bahías se comprobó que las dos costas presentan diferentes patrones de respuesta (Cortés et al., 2017). Arica es más sensible a las características de la fuente del tsunami, mientras que Iquique muestra una respuesta similar para diferentes eventos de tsunami. Por su parte Catalán et al. (2015) señalan que en el terremoto de Pisagua (2014) en la bahía de Arica la onda de mayor amplitud llegó 90 minutos después del sismo.

Diferentes reportes e investigaciones han permitido dar a conocer fenómenos particulares de los tsunamis y han dejado en evidencia que su comportamiento puede variar según sea la bahía afectada por el evento y también como ciertos factores influyen en la propagación del tsunami desde aguas profundas a la costa. Aun así, pese a los avances en el área sigue existiendo la incógnita de que tan influyentes son estos factores en el tsunami, y que tanto varían los casos según sea la bahía de análisis, por lo que es necesario, a partir de modelos numéricos de simulación de tsunamis, analizar las diferentes bahías del país para tener comprensión de los comportamientos que se pueden generar en cada bahía en particular, con el objetivo de reducir la incertidumbre de los fenómenos que pueden ocurrir en las costas del país. Por lo tanto, el estudio de los tsunamis es relevante ya que los avances en el área generaran un mayor entendimiento del fenómeno, lo cual permitiría a las autoridades e investigadores la posibilidad de mejorar sistemas de prevención para enfrentar este tipo de eventos, como en el desarrollo de medidas de evacuación, las cuales podrían estar focalizada por localidad según la respuesta espectral que generaría un tsunami en la zona.

2 Estado de Arte

2.1 Resonancia en Tsunamis

La resonancia es un fenómeno que ocurre cuando la frecuencia de un sistema excitado oscila de forma cercana con una frecuencia natural. Es decir, si la frecuencia de oscilación generada por la fuerza externa es coincidente a la frecuencia natural del sistema se produce una amplificación significativa de la amplitud de oscilaciones. Esto se debe a que la energía se transfiere de manera eficiente entre la fuente y el sistema, lo que resulta en un aumento en la amplitud de las ondas.

Se ha demostrado que la resonancia puede tener un papel importante en la amplificación de las olas de tsunami en algunas zonas costeras, donde el comportamiento del tsunami puede estar influido principalmente por la batimetría local más que por las características del tsunami en su origen (Aránguiz et al., 2019). La resonancia en tsunamis genera eventos de mayor energía, lo cual significa un incremento en la amenaza que puede generar un tsunami en las costas del país, considerando que Chile es un país con alta urbanización en las zonas costeras se debe considerar que la vulnerabilidad en las ciudades costeras es alta, por lo tanto la resonancia induce a un aumento del riesgo generado al momento de ocurrir un tsunami.

El uso del análisis modal, de los espectros de fondo y de tsunamis son métodos eficaces para identificar los modos de oscilación naturales (Aguilera, 2021) y comprobar el fenómeno de resonancia en la bahía de estudio. A partir de este tipo de análisis se ha podido clasificar una bahía según su respuesta espectral en este tipo de eventos: las bahías se clasifican como de comportamiento resonante o no resonante. Las bahías resonantes son las que evidencian altas amplitudes en sus espectros y una relación entre la respuesta espectral y la batimetría, mientras que las bahías no resonantes por su parte son las que presentan mayor aleatoriedad en su respuesta espectral debido a la poca influencia del fondo marino en el comportamiento del tsunami y la alta sensibilidad a la fuente tsunamigénica.

2.2 Influencia de la batimetría en tsunamis

La teoría de resonancia de olas y de la influencia de fuente y fondo en los espectros de los tsunamis se fundamenta a partir de los estudios de Rabinovich (1997), en donde plantea un modelo que relaciona los espectros de tsunami con la fuente tsunamigénica y el fondo marino. En primer lugar, se establece que las oscilaciones registradas por un mareógrafo pueden ser representadas por la siguiente ecuación.

$$\zeta(t) = \zeta_t(t) + \zeta_b(t) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

Donde $\zeta_t(t)$ corresponde a la señal propia del tsunami generada por un sismo, $\zeta_b(t)$ a la señal del ruido de fondo y $\varepsilon(t)$ como el error instrumental. Adicionalmente la onda generada por el tsunami se representa como una convolución de la respuesta batimétrica $w(t)$ y la fuente $E_\tau(t)$.

$$\zeta_t(t) = \int_0^{\infty} w(\tau) \cdot E_\tau(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

La ecuación (2) transformada en el dominio de las frecuencias se expresa de la siguiente forma.

$$S_t(\omega) = W_t(\omega) \cdot Z(\omega) \quad (3)$$

Donde $S_t(\omega)$ corresponde al espectro del tsunami en costa, $W_t(\omega)$ la función de admitancia y $Z(\omega)$ corresponde al espectro del tsunami en la fuente. Por su parte la función de admitancia corresponde a la función de transferencia topográfica entre aguas someras y aguas profundas, la cual se expresa como.

$$W_t(\omega) = Y_t(\omega) \cdot Q_t(\omega) \cdot P_t(\omega) \quad (4)$$

Donde $Y_t(\omega) \cdot Q_t(\omega) \cdot P_t(\omega)$ corresponden a la influencia de la batimetría diferenciadas en su componente global (mar abierto), regional (plataforma continental) y local (bahía) respectivamente.

Las señales de ruido de fondo (ζ_b) puede trabajarse de forma análoga a la señal del tsunami (ζ_t), de esta forma es posible describir el espectro de fondo con la siguiente ecuación.

$$S_b(\omega) = S_o(\omega) \cdot Q_b(\omega) \cdot P_b(\omega) \quad (5)$$

Donde $Q_b(\omega) \cdot P_b(\omega)$ corresponden a funciones de transferencia relacionadas a la plataforma continental y a la bahía respectivamente. En cuanto a $S_o(\omega)$ corresponde al espectro mar adentro, pero Rabinovich (1997) establece que el espectro de fondo en mar abierto no posee picos espectrales y es universal, fundamentándose de la teoría de oleaje que señala que las olas en aguas profundas no sienten el fondo marino. Esta hipótesis complementada con estudios previos llevó a Rabinovich (1997) a establecer una relación entre los componentes de las ecuaciones (4) y (5).

$$Q_t(\omega) = Q_b(\omega) \text{ y } P_t(\omega) = P_b(\omega) \quad (6)$$

Esta igualdad implica que la plataforma continental y la batimetría de la bahía modifican ondas de tsunamis y atmosféricas de igual forma. A partir de esto Rabinovich (1997) logra establecer una influencia entre fondo marino, fuente y la respuesta espectral de un tsunami. Esta teoría toma relevancia en el estudio de la resonancia, ya que al identificar y aislar la influencia batimétrica se puede comprobar si los picos asociados al espectro de fondo representan los posibles máximos relacionados con las características que se presentan ante una perturbación externa.

2.3 Influencia de la fuente en tsunamis

Adicionalmente Rabinovich (2009) plantea por medio de la fórmula de Merian un método para estimar periodos efectivos generados por un sismo. Esta fórmula considera que el sismo al generar deformaciones en el fondo marino se producirán las oscilaciones cuyo periodo dependerá del área de ruptura y profundidad del sismo.

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{g \cdot H}} \quad (7)$$

Donde:

n : *nodofundamental*(1,2,...)
 H : *profundidad media del área de ruptura*
 L : *longitud media del área de ruptura*
 g : *aceleración de gravedad*

De la ecuación (7) se infiere que un sismo que posee un área de ruptura menor generará un conjunto de periodos más cortos, mientras que una ruptura mayor genera periodos más largos en la bahía y se establece una relación entre las características de la fuente y el comportamiento del tsunami.

2.4 Espectro de fondo

Considerando la metodología de Rabinovich (1997) se puede establecer que el fondo marino puede jugar un rol importante en el fenómeno de resonancia y propagación de ondas de tsunami. Para describir el fondo marino se utiliza el espectro de fondo como herramienta de análisis, la representación gráfica de un espectro de fondo permite identificar los períodos fundamentales seleccionados o excitados por el fondo marino y ver su coincidencia con los periodos fundamentales obtenidos de una simulación de espectros de tsunami. El espectro de fondo corresponde a una caracterización de la distribución de las amplitudes del ruido de fondo el cual corresponde a una componente mareal que se obtiene a partir de las mediciones de mareógrafos.

La obtención de los espectros de fondos se realiza mediante las mediciones de nivel de marea, los mareógrafos cuentan con mediciones de todos los componentes mareales, por lo tanto para la construcción de los espectros de fondo se extraen periodos de tiempo significativos, con el objetivo de filtrar algunos componentes mareales como la marea astronómica y meteorológica y se pueda obtener un ruido de fondo sin anomalías que distorsionen el espectro. Adicionalmente se le realiza un filtro de las componentes mareales astronómicas con el código Utide de lenguaje Python y adicionalmente se filtran ruidos resultantes. Realizados los filtros correspondientes se obtiene la componente mareal denominada ruido de fondo.

Es importante señalar que Chile cuenta con una red importante de mareógrafos en funcionamiento, por lo que existe un constante monitoreo de las mareas de las principales costas del país, estos mareógrafos son monitoreados por parte del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y se pueden obtener de la página del Flanders Marine Institute (www.ioc-sealevelmonitoring.org). Por lo tanto es posible obtener espectros de fondo de las principales bahías del país.

A partir de la memoria de Mauricio Díaz (2022) se lograron obtener los espectros de fondo para 5 bahías de la zona centro del país. De tales resultados es importante señalar que Coquimbo y Puerto Aldea en su configuración presentan picos espectrales bien marcados, mientras que el espectro de San Antonio presenta una distribución más homogénea, salvo con un pico espectral en el periodo de los 28 minutos (véase Figura 2-1). Para la obtención específica de los espectros de fondos presentados en la Figura 2-1 se utilizaron un total de 2 años de mediciones, separadas en series de tiempo de 16 horas con una resolución de 1 minuto por registro, el objetivo de hacer múltiples series de tiempo (curvas grises) fue para realizar un promedio que marcara una representación del ruido del fondo confiable (curva roja)

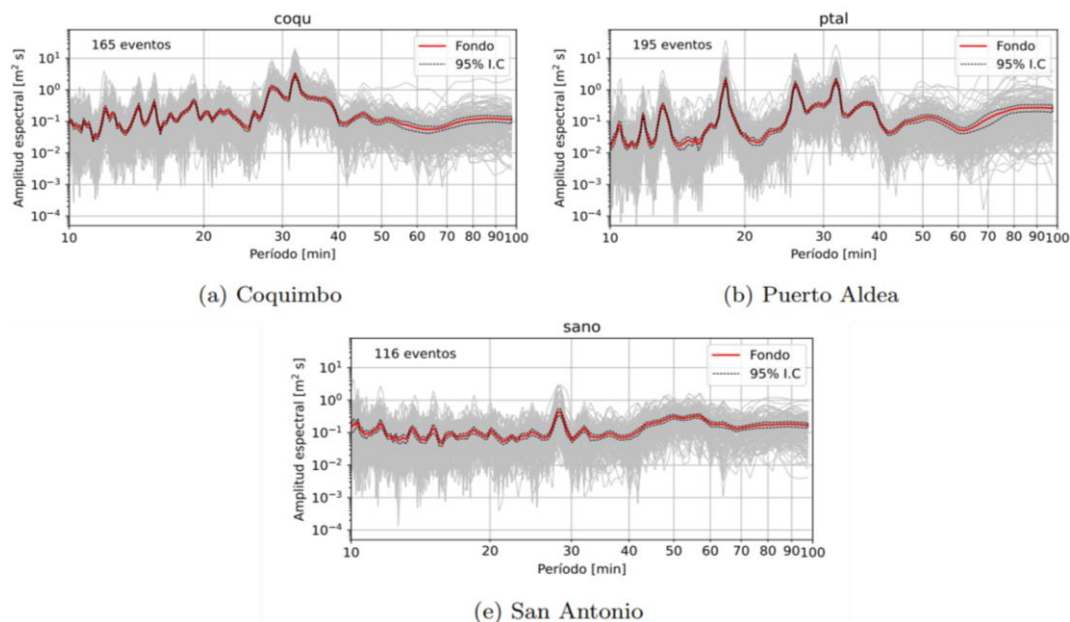


Figura 2-1: Espectros de fondo de Coquimbo, Puerto Aldea y San Antonio. Fuente: Díaz (2022)

2.5 Resonancia de bahías en Chile

Gracias al desarrollo de un software de modelación numérica denominado Tsunami HySea (Macías et al., 2017) ha sido posible modelar simulaciones de tsunamis en diversas costas del país a partir de ciertos datos de entrada. HySea es un software modelador de tsunamis que entrega series de tiempo de inundación en series de tiempo, en puntos específicos denominados boyas virtuales. El software requiere como datos de entrada la deformación del fondo marino, esta deformación es entregada en los términos de Okada (1985). Los datos de entrada son transmitidos como una perturbación de la superficie del mar desde la zona de generación y se propaga hacia la costa. En el proceso de propagación se debe considerar un nivel fijo de marea y la batimetría de la zona. Estos datos son utilizados para la resolución de las ecuaciones en aguas poco profundas planteadas por la teoría lineal de oleaje, usando el método de volumen finito para calcular los parámetros de la ola. Con estos datos a disposición el software HySea entrega series de tiempo de la inundación o nivel del mar en la zona costera.

A partir de las herramientas numéricas dispuestas por Macías et al. (2017) y siguiendo la metodología de análisis de Rabinovich (1997), previos memoristas (Aguilera, 2021; Díaz, 2022) desarrollaron en sus investigaciones un análisis de comportamiento de sensibilidad de espectros de tsunami, realizando su estudio y simulaciones numéricas de tsunamis en distintas bahías de la zona central del país.

Valentina Aguilera (2021) analizó la influencia de la fuente tsunamigénica en la respuesta resonante en bahías de la zona centro de Chile. El objetivo de la investigación consistía en identificar la sensibilidad de estas localidades ante la deformación generada por el sismo, y analizar la trascendencia del fondo marino en la respuesta espectral de las bahías.

Las conclusiones de Valentina Aguilera (2021) fueron que existen bahías menos sensibles a la fuente tsunamigénica y que su comportamiento se ve influenciado por la batimetría, es decir, bahías denominadas resonantes. Estas bahías resultaron ser Choros, Coquimbo, Tongoy y Quinteros. Mientras que las bahías de Valparaíso y San Antonio mostraron mayor variabilidad y se denominaron bahías no resonantes.

En cuanto a Mauricio Díaz (2022) su investigación estuvo enfocada en un análisis de resonancia de bahías por medio de la simulación de eventos, considerando la propagación desde aguas profundas hasta aguas someras. Para ello realizó simulaciones del HySea en ambas situaciones y utilizó la función de admitancia como herramienta para estudiar el comportamiento de una bahía. Adicionalmente desarrolló la construcción de espectros de fondo para sus bahías seleccionadas.

Las bahías de estudio de Mauricio Díaz (2022) correspondieron a Coquimbo, Puerto Aldea, Los Vilos, Quintero, Concón, Valparaíso y San Antonio. A partir de sus simulaciones y el análisis de espectros realizados logró obtener las siguientes conclusiones: la función de admitancia resulta ser una herramienta útil para el análisis de propagación de un tsunami desde aguas profundas a someras. Además la función de admitancia permite identificar periodos resonantes de la bahía y refleja la proporción en la que estos se verán amplificados. Respecto al comportamiento de las bahías señaló que las bahías de Coquimbo, Puerto Aldea y Quintero poseen un marcado comportamiento resonante, mientras que San Antonio y Los Vilos demuestran mayor variación en sus picos espectrales llevando a concluir que son más susceptibles a la fuente que a la batimetría y son consideradas bahías no resonantes. Finalmente concluye que Valparaíso y Concón presentan un comportamiento intermedio influenciado tanto por la fuente y el fondo marino. A continuación se presentarán resultados que ejemplifican lo señalado anteriormente.

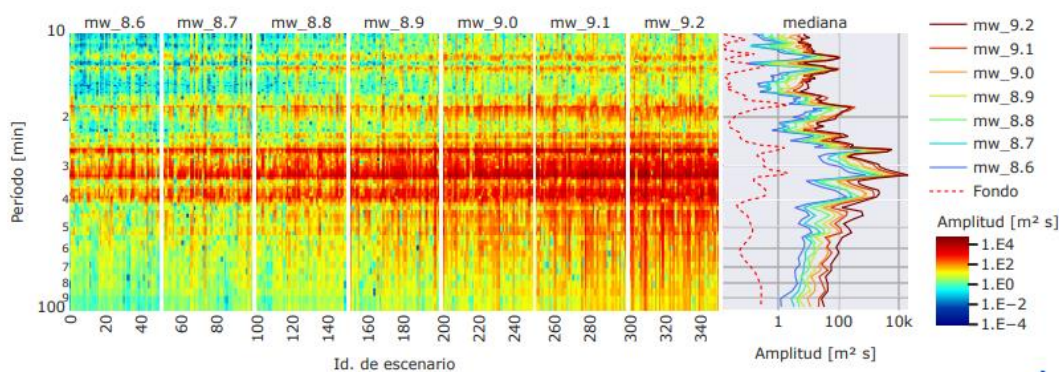


Figura 2-2: Espectrograma de tsunami en bahía de Puerto Aldea. Fuente: Díaz (2022)

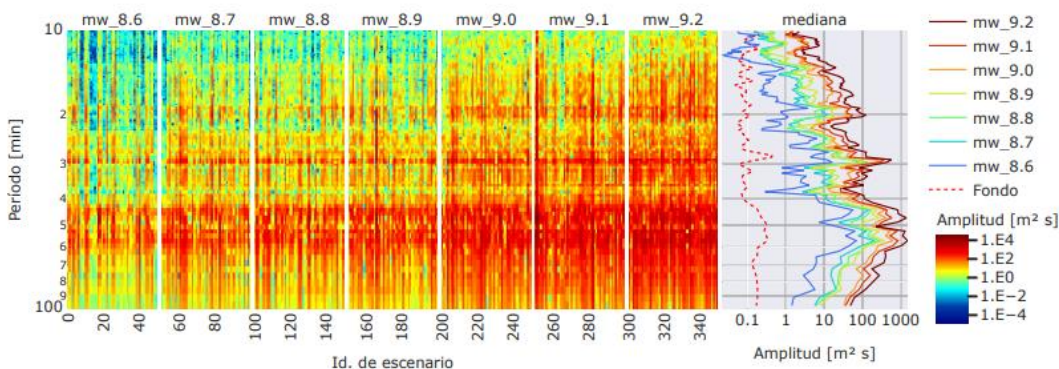


Figura 2-3: Espectrograma de tsunami en bahía de San Antonio. Fuente: Díaz (2022)

De la Figura 2-2 se aprecia que los resultados para Puerto Aldea generan bandas de colores con tendencias marcadas en periodos definidos (26 y 32 [min]), mientras que en San Antonio se visualiza mayor dispersión de colores (véase Figura 2-3) lo cual es el comportamiento representativo de una bahía no resonante.

Finalmente, ambas investigaciones permiten caracterizar y describir el comportamiento de varias bahías de la zona central del país, posibilitando la clasificación de las bahías como resonante o no resonante según su respuesta espectral.

2.6 Definición del problema

A partir de las investigaciones previas se ha concluido que bahías denominadas resonantes cuentan con una menor sensibilidad ante la fuente tsunamigénica, debido a que los múltiples escenarios de simulación generaban comportamientos similares, siendo en estos casos la batimetría un factor influyente en el comportamiento espectral del tsunami debido a que distribuye su energía en los mismos períodos resonantes marcados por el espectro de fondo.

Por su parte las bahías no resonantes presentan mayor sensibilidad a las características de la fuente, presentando mayor variabilidad espectral ante los distintos escenarios modelados y que ante esta sensibilidad respecto a la fuente existe una mayor variabilidad en la distribución de energía. (Aguilera, 2021).

Por lo tanto debido la variabilidad presentada en el caso de las bahías no resonantes, existe la incógnita de que tan influyentes son ciertas características específicas de la fuente tsunamigénica en los distintos comportamientos espectrales que se presentan, y si existe alguna relación entre estas características de la fuente y los distintos comportamientos espectrales del tsunami.

3 Objetivos

A partir del problema definido relacionado con la incertidumbre en el comportamiento de las bahías no resonantes, se establecen los siguientes objetivos.

3.1 Objetivo General

- Analizar la influencia de la fuente tsunamigénica en el comportamiento de las bahías de comportamiento no resonante como son Valparaíso y San Antonio, a partir de la variación de la deformación y ubicación del sismo.

3.2 Objetivos específicos

- Separar los espectros del tsunami según sus picos espectrales y periodos característicos a partir de la metodología de desagregación de datos.
- Comparar cada grupo de espectros separados con el tipo de fuente tsunamigénica que le corresponda.
- Relacionar cualitativamente características de los sismos generadores de los tsunamis con su comportamiento espectral
- Verificar la validez de la fórmula de Merian en el caso de las bahías de San Antonio y Valparaíso

4 Metodología

4.1 Proceso metodológico

Para identificar patrones de comportamiento en las bahías de estudio se realizará un análisis espectral tanto para los sismos como para los tsunamis simulados en investigaciones previas (Mauricio Díaz, 2022). Respecto al sismo, este está representado por un mapa de deformaciones en el plano horizontal, mientras que para los tsunamis se cuenta con series de tiempo del nivel de profundidad de inundación. Para ambos casos se realizará un análisis con la transformada de Fourier y se construirán espectrogramas por cada cambio en magnitud en los sismos, el cual está un rango magnitud de momento (M_w) de 8.6 a 9.2, dejando en total 7 espectrogramas para la fuente y el tsunami respectivamente, con un total de 50 escenarios por espectrograma. Esta herramienta gráfica será de utilidad para la búsqueda de patrones en los distintos casos, dado que a partir de banda de colores se puede analizar la dispersión o uniformidad de resultados.

Adicionalmente a cada conjunto de datos se les realizará un análisis por medio de una metodología de desagregación de datos y clustering con el objetivo de buscar posibles relaciones entre fuente tsunamigénica y respuesta espectral del tsunami. Para el proceso de clasificación y ordenamiento de los escenarios se estudiarán los eventos según bandas de periodos característicos, las cuales se definen a continuación.

Tabla 1: Bandas de periodos. Fuente: Elaboración propia.

Rango de Periodos [minutos]		
Banda/ Bahía	San Antonio	Valparaíso
Banda N°1	10-14	10-14
Banda N°2	15-20	14-18
Banda N°3	25-32	20-30
Banda N°4	35-65	32-52

En cada banda de periodo se extraerá el área bajo la curva del PSD (Power Spectral Density) para cada escenario. Dado que el PSD es la densidad de la energía de la señal que se obtiene a partir de la transformada de Fourier, la estimación del área bajo la curva resulta ser una herramienta cuantitativa para representar la energía contenida en una señal en función de la frecuencia o periodo. Este valor se designará como S_b y corresponde a la medida cuantitativa para clasificar los escenarios según sus características energéticas.

Para la estimación del PSD se utilizó una transformada de Fourier con un filtro de Hanning igual a 5, aplicado en códigos en lenguaje Python. La elección de un filtro de Hanning está relacionado a la resolución de los datos, ya que un filtro de Hanning apropiado suaviza las curvas de PSD, reduciendo el ancho espectral pero sin alterar la representatividad del resultado.

Respecto al procedimiento para obtener del área bajo la curva (S_b) los resultados de la FFT se obtienen en escala logarítmica por lo que las primeras bandas de análisis tendrán mayor cantidad de datos que las ultimas, por lo tanto, dada las características de los datos, se utiliza la función SIMPS de lenguaje Python, el cual utiliza la regla de Simpson para la integración numérica, dado que no requiere datos igualmente espaciados entre sí. Este método se basa en la idea de aproximar el área bajo una curva mediante el uso de polinomios de segundo grado.

Una vez realizado el cálculo para cada uno de los 50 escenarios se obtendrá una lista de datos para cada banda, a los cuales se les realizará un ordenamiento y análisis estadístico calculando parámetros como los cuartiles y deciles de la muestra. El objetivo es analizar las características de cada banda de periodo, comparar los escenarios en cuanto a sus cualidades energéticas según la simulación realizada y posteriormente asociarlas a las características de su respectiva fuente tsunamigénica.

4.2 Análisis espectral del tsunami en costa.

El procedimiento de trabajo consistirá en extraer las boyas virtuales asociadas a las coordenadas de interés correspondientes a Coquimbo, Los Vilos, Valparaíso y San Antonio. Para la selección de la boya de análisis se utilizará la boya ubicada en el primer modo de vibrar de cada bahía de estudio, esta información es posible de obtener gracias al Atlas de resonancia de tsunami de CIGIDEN (Cortés & Catalán, 2016).

El análisis de clasificación y búsqueda de patrones aplicando el proceso metodológico se realizará para las bahías de San Antonio y Valparaíso debido a las características no resonantes que ambas bahías poseen, para la bahía de Coquimbo y Los Vilos se realizará un análisis espectral con la FFT netamente para un análisis del aporte espectral de la batimetría ($W_t(t)$).

La estrategia a seguir será realizar el procedimiento para 50 escenarios de una magnitud definida, y luego de realizar el trabajo con los 7 grupo de magnitudes distintas de forma separada se realizará un análisis global con las 350 simulaciones. Con tal de expandir el estudio contemplando el cambio de magnitud de las simulaciones como variable adicional en la búsqueda de patrones de comportamiento de bahías no resonantes.

4.3 Análisis de la fuente tsunamigénica

Respecto a las características de la fuente, se debe considerar que se disponen de 350 sismos aleatorios en su slip, área y profundidad de ruptura obtenidos a partir de la distribución aleatoria de LeVeque et al. (2016) y Melgar et al. (2016). Por lo tanto, cada evento generará distintos escenarios de deformación en el fondo marino, el cambio de la deformación variará en cuando a su magnitud, distribución y localización en el espacio, por lo tanto para el análisis de la fuente se considerarán estos factores para la caracterización del sismo.

Previo al análisis espectral se realizará un filtro de las deformaciones donde solo se considerarán las deformaciones registradas en el mar y se les aplica un filtro con el promedio de dichas deformaciones. Esta decisión se apoya a partir los estudios de Matías Carvajal et al. (2017) donde a partir de estudios de terremotos históricos en el país, se señala que en la zona central de Chile los terremotos con ruptura somera, es decir los que presentan una falla bajo el mar, son los sismos que generan tsunamis grandes y energéticos, mientras que los terremotos con ruptura profunda, con la falla en la zona continental, logran levantar la costa pero no logran grandes deformaciones en el mar.

La realización de la FFT en las deformaciones filtradas genera un espectro 2D, el cual para debe ser transformado a un espectro en una dimensión para un análisis comparativo los espectros de tsunamis, para ello se utiliza el método del módulo aplicado en los números de ciclos por unidad de longitud (k). Considerando que los espectros de deformación se representan de forma matricial con un k_x y k_y asociados a las filas y columnas respectivamente. El paso a una dimensión se realiza asociando un valor del espectro a una posición $k_{x,i}$, $k_{y,j}$, se calcula el módulo entre ambos valores ($|k|$) y se construye una matriz de dos columnas con los módulos de la combinatoria de los números de ciclos (k) y el espectro asociado, en caso de que el módulo para ciertas posiciones fuera a coincidir debe sumarse los espectros asociados al módulo coincidente. Finalmente la matriz de dos columnas debe ser ordenada de menor a mayor en función de los números de ciclos obteniendo un espectro como el ejemplificado en la Figura 4-1

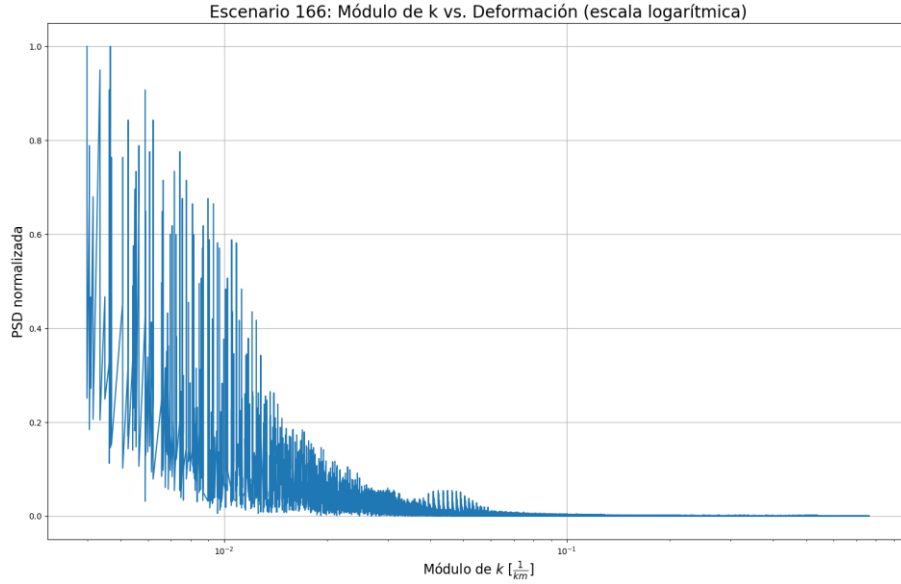


Figura 4-1: Espectro de deformación unidimensional en número de ciclos, escenario 166. Fuente: Elaboración propia.

Una vez desarrollado el espectro para un escenario, se debe pasar de número de ciclos (k) a periodos (T). Para ello se utilizan las ecuaciones de la teoría lineal de oleaje, donde nos señala que en aguas someras la velocidad de propagación de onda (C) puede expresarse como se presenta en la ecuación (8)

$$C = \sqrt{g \cdot h} \quad (8)$$

Estimando una profundidad promedio (h) calculada a partir de las profundidades donde se registre deformaciones en el mar se puede obtener una velocidad de propagación de onda (C) constante para cada escenario y de esta forma expresar el periodo en función de la velocidad y del número de ciclos de la onda a partir de la siguiente relación.

$$C^2 = L^2 / T^2 \quad (9)$$

$$L = 2\pi / k \quad (10)$$

$$T = 2\pi / k \cdot \sqrt{g \cdot h} \quad (11)$$

La hipótesis de considerar el oleaje de tsunamis como un análisis en aguas someras tiene validez debido a que olas de tsunamis tienen periodos tan largos que pueden sentir la profundidad del mar en zonas que el oleaje normal no puede. Por lo tanto para fines de estudio se trabaja un rango de periodos entre los 10 a 110 [min]. A continuación se presenta un resultado de los cálculos como ejemplo.

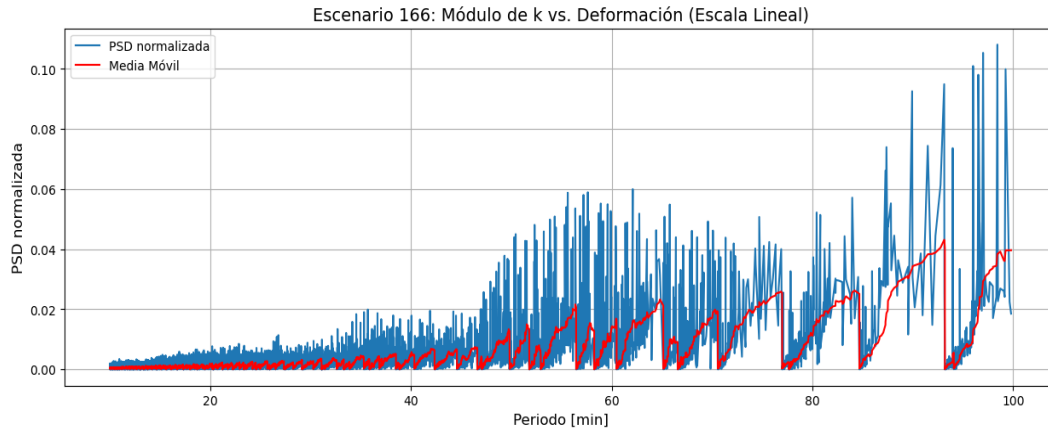


Figura 4-2: Espectro de deformación unidimensional en periodos, escenario 166. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la variación de velocidad (C) por escenario, cada caso de estudio contará con distintos periodos y dimensión. Por lo tanto para realizar espectrogramas con un mismo dominio, se realiza una interpolación lineal utilizando los periodos obtenidos en el análisis espectral de los tsunamis. Debido a la cantidad de datos originales disponibles la interpolación lineal representa una aproximación cercana al caso original y mantiene la tendencia observada en el análisis espectral.

Finalmente el proceso debe ser realizado para los 350 escenarios y deben ser agrupados en 50 casos por la magnitud del sismo, para la realización de espectrogramas, clasificación y reagrupación de escenarios a partir del criterio energético explicado previamente.

4.4 Relación entre fuente y tsunami

Por medio de la ecuación (3) de la teoría de Rabinovich (1997) se tiene una expresión matemática para estimar el aporte espectral de la batimetría en el tsunami ($W_t(t)$). A partir de la estimación de los espectros interpolados de la fuente ($Z(t)$) y los espectros del tsunami ($S_t(t)$) se tienen espectros del aporte de la batimetría en un mismo dominio de periodo. Para fines comparativos se realiza este cálculo en las bahías de Coquimbo, Los Vilos, Valparaíso y San Antonio.

Los cálculos realizados se presentan en forma de espectrogramas con tal de estimar un patrón de comportamiento de cada bahía y compararlo con las conclusiones obtenidos de Aguilera (2021) y Díaz (2022). Adicionalmente se calcula un promedio de ($W_t(t)$) para cada periodo del dominio de estudio y se realizan curvas para comparar la influencia del fondo marino en las 4 bahías.

5 Resultados

5.1 Análisis de fuente tsunamigénica

A partir del análisis espectral se generaron espectrogramas para la fuente, en la Figura 5-1 se presentan los 7 espectrogramas agrupados, las figuras separadas se presentan en el punto 9.1 de Anexos con mayor detalle para su análisis.

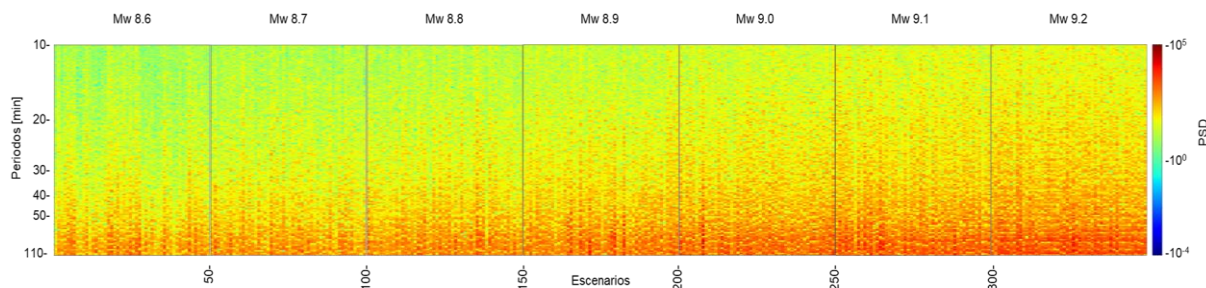


Figura 5-1: Espectrogramas de fuente. Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que la mayor concentración de PSD se da en los periodos más elevados, por sobre los 50 [min]. Aun así existen escenarios que presentan una cantidad de energía destacable entre los rangos de periodo de 10-40 [min]. Estos escenarios energéticos en los periodos más bajos no reflejan un patrón o uniformidad. Adicionalmente se observa que a medida que el M_w aumenta se evidencia un aumento del PSD en general y un aumento energético en el rango de periodos de 10-40 [min] manteniendo la distribución aleatoria observada en las magnitudes inferiores, este aumento del PSD se debe al incremento de magnitud que genera mayores deformaciones en los distintos escenarios.

5.1.1 Clasificación de Escenarios

A partir de los datos trabajados y representados en los espectrogramas se realiza la clasificación de escenarios utilizando S_b como criterio cuantitativo de energía para cada caso. De esta forma se obtienen los siguientes resultados, presentando el 10% de los casos más energéticos de cada magnitud.

Cabe señalar que los resultados presentados son utilizando como bandas de análisis las asociadas a San Antonio (véase Tabla 1), en los cálculos realizados durante la investigación también se realizó la clasificación utilizando las bandas asociadas a Valparaíso, evidenciando una baja variación en el ordenamiento de los escenarios.

Tabla 2: Escenarios más energéticos de fuente. Banda N°1

Mw 8.6	Mw 8.7	Mw 8.8	Mw 8.9	Mw 9.0	Mw 9.1	Mw 9.2
44	61	136	198	201	265	310
19	70	127	197	250	295	325
18	74	135	166	230	278	336
36	79	131	200	207	260	334
23	58	142	183	222	292	339

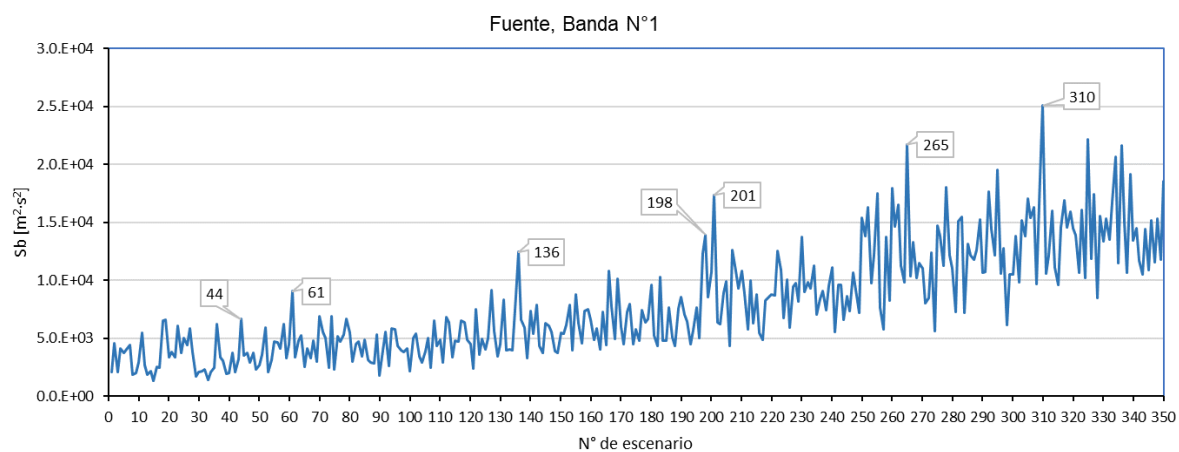


Figura 5-2: Sb de escenarios en la banda N°1 de fuente tsunamigénica. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3: Escenarios más energéticos de fuente. Banda N°4

Mw 8.6	Mw 8.7	Mw 8.8	Mw 8.9	Mw 9.0	Mw 9.1	Mw 9.2
44	52	136	183	208	265	310
18	70	119	166	250	262	334
7	61	138	180	201	278	309
19	74	112	169	207	260	341
25	77	127	172	246	252	327

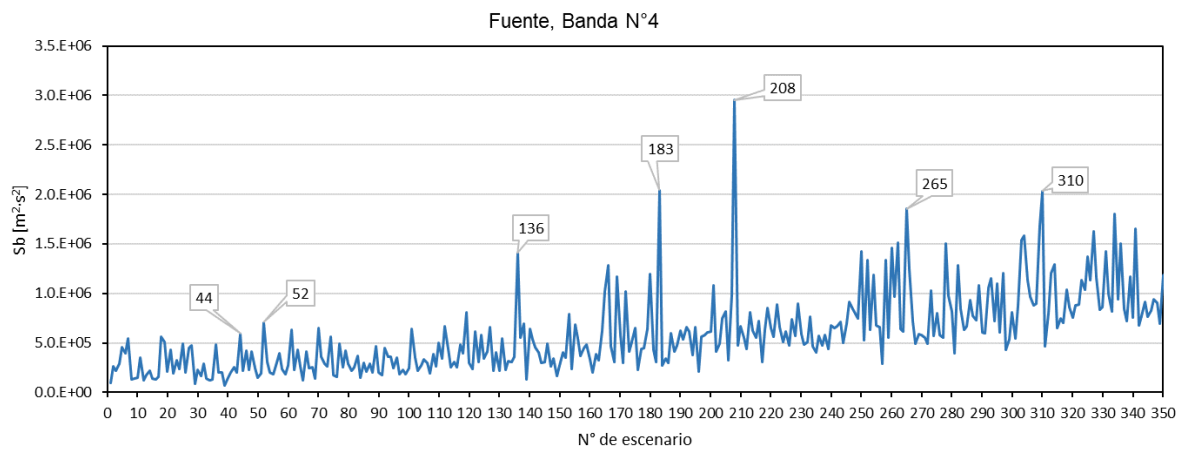


Figura 5-3: Sb de escenarios en la banda N°4 de fuente tsunamigénica. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Análisis Espectral del tsunami en costa

A partir del análisis espectral de cada escenario se construyen los espectrogramas para cada magnitud y bahía. A continuación se presentarán los espectrogramas generales para Coquimbo, Valparaíso y San Antonio a modo de comparación. En el punto 9.2 de Anexos se presentan los espectrogramas a mayor detalle para las bahías de estudio (Valparaíso y San Antonio) en todas las magnitudes.

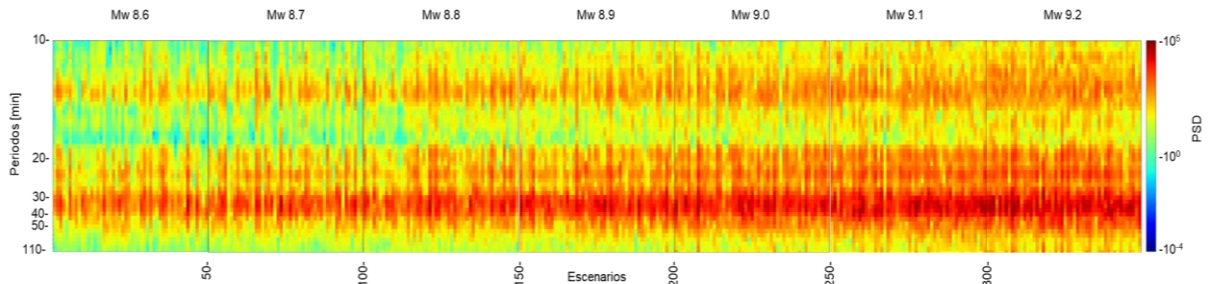


Figura 5-4: Espectrograma de Coquimbo, magnitud Mw 8.6. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los resultados observados en Coquimbo, se aprecia dos picos espectrales marcados en la mayoría de los casos, uno cercano a los 13 [min] y otro de mayor energía con un periodo cercano a los 35 [min], la presencia de un patrón de comportamiento en este rango de periodos es coincidente con el pico espectral evidenciado en el espectro de fondo de Coquimbo (véase Figura 2-1), lo cual señala las características propias de una bahía resonante.

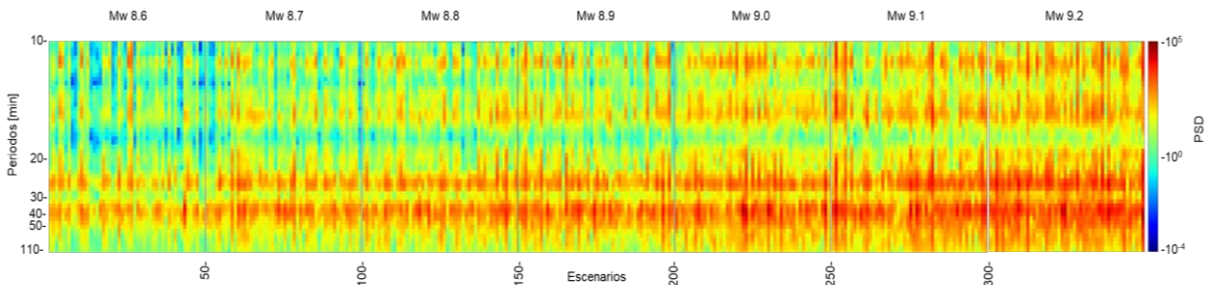


Figura 5-5: Espectrograma de Valparaíso, magnitud Mw 8.6. Fuente: Elaboración propia.

Valparaíso evidencia que hay varios picos de energía, presentes entre los 12, 25 y 40 [min] aproximadamente, pero a diferencia del espectrograma de Coquimbo no presenta magnitudes tan elevadas, una uniformidad en todos los escenarios y una clara tendencia en un periodo específico, además Valparaíso cuenta con escenarios que presentan un bajo PSD, evidenciado con los colores azules del espectrograma, este fenómeno no se visualiza en el espectrograma de Coquimbo.

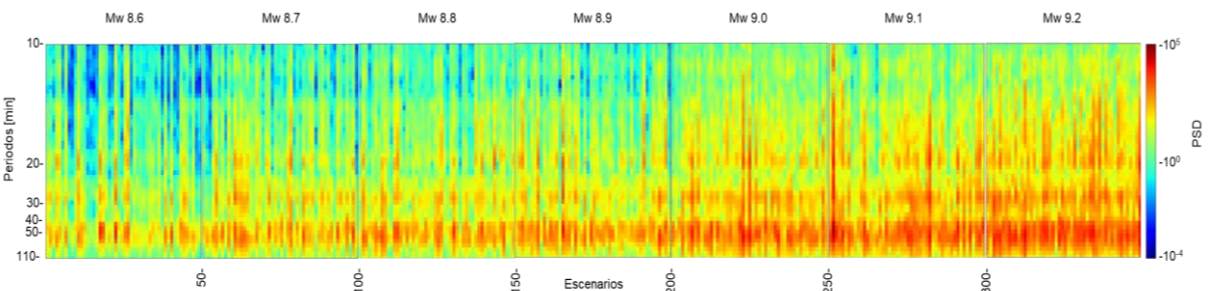


Figura 5-6: Espectrograma de San Antonio, magnitud Mw 8.6. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al espectrograma de San Antonio, se aprecia que la banda de mayor energía está entre los 40-50 [min] aproximadamente pero al igual que en Valparaíso no se presenta un patrón en todos los

escenarios. Solo algunos presentan un elevado PSD mientras que otros escenarios presentan bajos registros de PSD, principalmente marcados en los primeros periodos de análisis (10-20 [min]), estos bajos valores de PSD son muchos más evidentes que en la bahía de Valparaíso, señalando que San Antonio es la bahía con características no resonantes, debido a la aleatoriedad o dispersión de datos y al orden de magnitudes presentado.

5.2.1 Clasificación Valparaíso

A partir de investigaciones previas y los resultados obtenidos se evidencia que San Antonio y Valparaíso presentan características no resonantes y por lo tanto su comportamiento puede tener influencia de la fuente. Por lo tanto para ambas bahías se realiza una clasificación utilizando el valor S_b como criterio de ordenamiento. A continuación se presentan los resultados de Valparaíso.

Tabla 4: Escenarios menos energéticos (primer decil) de Valparaíso. Banda N°4. Fuente: Elaboración propia.

Mw 8.6	Mw 8.7	Mw 8.8	Mw 8.9	Mw 9.0	Mw 9.1	Mw 9.2
16	80	116	188	239	272	316
28	60	128	163	216	271	314
33	86	133	185	250	274	321
38	58	137	165	246	268	312
14	68	106	196	215	280	326

Tabla 5: Escenarios más energéticos (decimo decil) de Valparaíso. Banda N°4. Fuente: Elaboración propia.

Mw 8.6	Mw 8.7	Mw 8.8	Mw 8.9	Mw 9.0	Mw 9.1	Mw 9.2
44	63	147	175	222	252	350
11	74	119	197	223	278	325
48	61	122	170	230	276	339
23	76	108	160	249	300	324
4	92	146	180	208	299	310

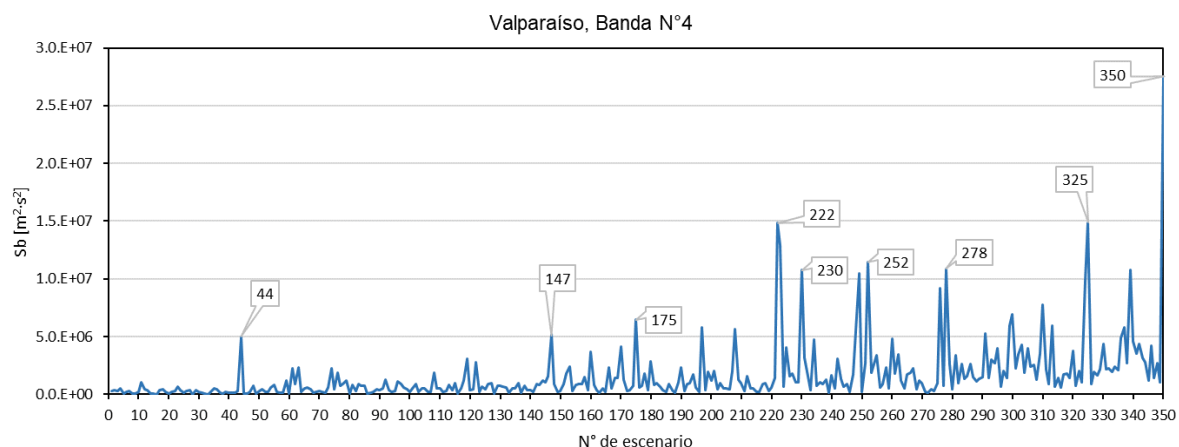


Figura 5-7: S_b de escenarios en la banda N°4 de Valparaíso. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Clasificación San Antonio

A continuación se presenta la clasificación para la bahía de San Antonio.

Tabla 6: Escenarios menos energéticos (primer decil) de San Antonio. Banda N°4. Fuente: Elaboración propia.

Mw 8.6	Mw 8.7	Mw 8.8	Mw 8.9	Mw 9.0	Mw 9.1	Mw 9.2
16	87	128	165	202	268	323
8	93	133	183	210	259	311
42	58	137	159	240	295	328
14	80	101	174	247	265	342
15	100	111	187	236	297	302

Tabla 7: Escenarios más energéticos (decimo decil) de San Antonio. Banda N°4. Fuente: Elaboración propia.

Mw 8.6	Mw 8.7	Mw 8.8	Mw 8.9	Mw 9.0	Mw 9.1	Mw 9.2
23	99	131	166	225	252	350
18	61	113	197	222	283	313
41	94	108	175	223	292	335
19	83	140	170	207	296	334
27	72	112	158	230	255	308

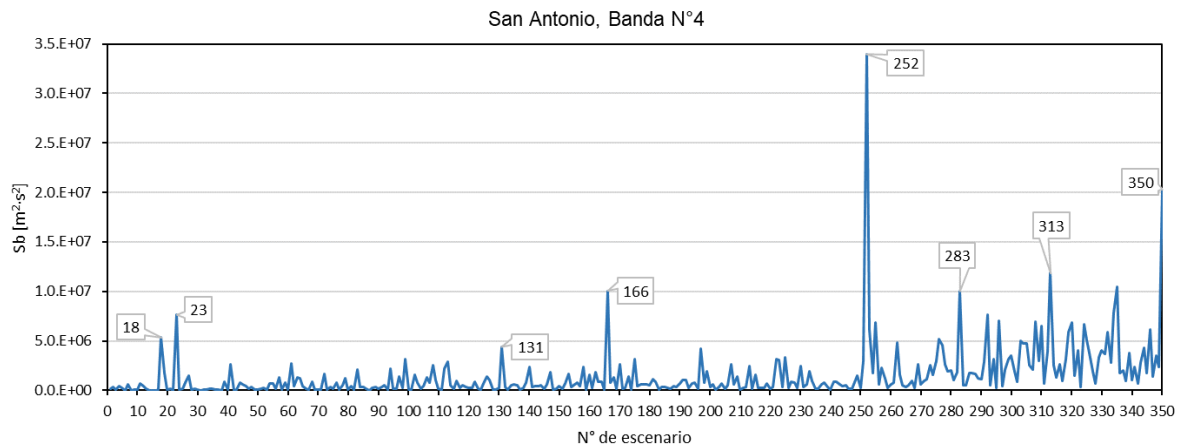


Figura 5-8: Sb de escenarios en la banda N°4 de San Antonio. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Influencia de la batimetría

El cálculo de $W_t(t)$ se realiza para las bahías de Coquimbo, Los Vilos, Valparaíso y San Antonio. A continuación se presentan los resultados con magnitud M_w 8.6, los resultados con las otras magnitudes se presentan en 9.3 de Anexos.

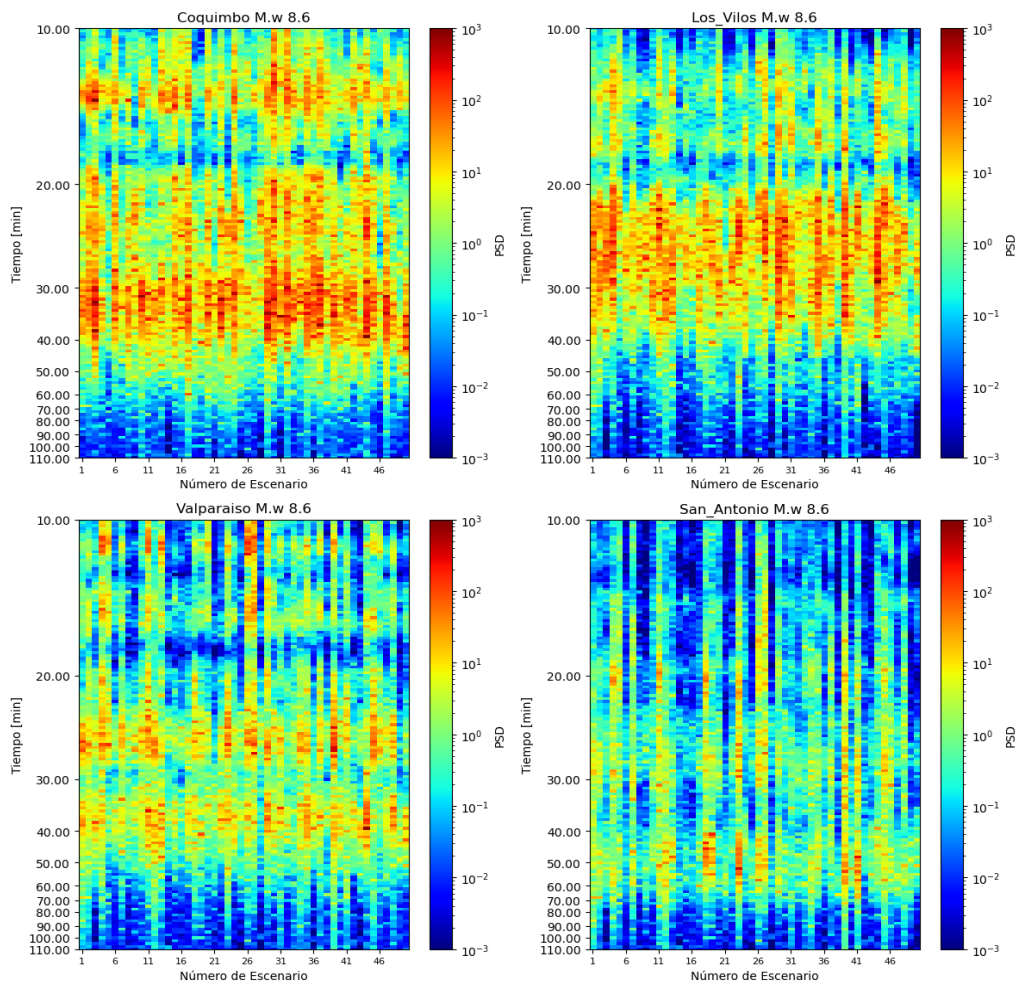


Figura 5-9: Espectrogramas de $W_t(t)$ para las bahías de Coquimbo, Los Vilos, Valparaíso y San Antonio.

Magnitud M_w 8.6. Fuente: Elaboración propia

Se aprecia a partir de la Figura 5-9 que las bahías de Coquimbo y Los Vilos tienen bandas de energía marcadas en ciertos rangos de periodos, mientras que los espectrogramas de Valparaíso y San Antonio presentan bajos niveles de magnitud de PSD. Este comportamiento espectral se corrobora con lo evidenciado en la Figura 5-10 donde se presenta el promedio de PSD de los escenarios. En el grafico se visualiza un alto aporte de Coquimbo, seguido por Los Vilos. Coquimbo presenta dos picos espectrales, uno de menor magnitud marcado en los 13 [min] y otro de alta magnitud en los 35 [min], los Vilos por su parte presenta un pico entre los 20-30 [min]. Valparaíso y San Antonio presentan bajo aporte en su $W_t(t)$ en comparación a las otras dos bahías, Valparaíso presenta 3 picos de baja magnitud en los periodos de 10, 25 y 40 [min] aproximadamente, mientras que San Antonio presenta una pequeña alza en su $W_t(t)$ cerca de los 50 [min] pero es la que presenta menor magnitud entre todas las bahías. Este comportamiento se evidencia de igual forma con las otras magnitudes.

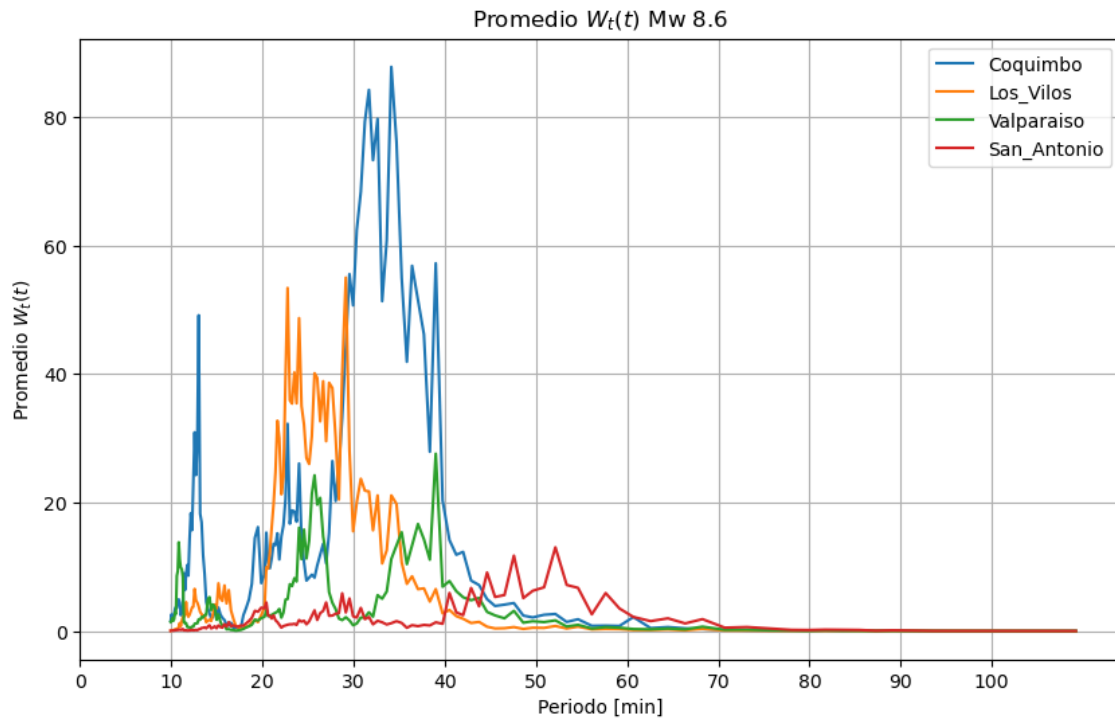


Figura 5-10: $W_t(t)$ promedio. Magnitud M_w 8.6. Fuente: Elaboración propia.

6 Discusión

6.1 Influencia de la fuente en las bahías de Valparaíso y San Antonio

A partir del cálculo matemático del aporte espectral batimétrico ($W_t(t)$) es posible caracterizar a las bahías bajo ciertos comportamientos, Coquimbo y Los Vilos se caracterizan por tener un aporte espectral considerable por parte de la batimetría, esto significa que la topografía del lecho marino influye en la energía de los tsunamis en tales bahías, particularmente la bahía de Coquimbo presenta un claro patrón en el periodo cercano a los 35 [min] lo cual coincide con el comportamiento observado en los espectros de tsunami de Coquimbo, esto se corrobora con los resultados y conclusiones previas de Valentina Aguilera (2021) y Mauricio Díaz (2022) donde se señala que la bahía de Coquimbo tiene un comportamiento resonante, debido a las similitudes entre el espectro de fondo, los espectros de tsunami y la función de aporte batimétrico $W_t(t)$ que coinciden en presentar una alta amplitud de PSD en un periodo cercano a los 35 [min].

Por su parte las bahías de Valparaíso y San Antonio se puede apreciar que el aporte espectral de la batimetría es bajo, por lo tanto se concluye a partir de la ecuación (3) de Rabinovich (1997) que el aporte energético de un tsunami en estas bahías se da principalmente por la energía de la fuente tsunamigénica. Este patrón de comportamiento no resonante se presenta en mayor medida la bahía de San Antonio, donde las magnitudes de $W_t(t)$ son las más bajas registradas entre las bahías de estudio y se aprecia que no hay un periodo particularmente marcado donde predomina un pico energético.

Valparaíso por su parte registra una baja influencia de la batimetría en ordenes de magnitud, aun así a diferencia de San Antonio presenta algunos picos de energía marcados en un rango de periodos de 25 a 30 [min] y otro entre los 35 a 45 [min]. A partir de esto se infiere que Valparaíso presenta ciertos patrones de una bahía resonante debido a los picos de energía marcados en periodos específicos, pero el aporte de la batimetría en el comportamiento espectral es bajo por lo visto de las curvas de $W_t(t)$. Por lo tanto, se concluye que Valparaíso tiene un comportamiento mixto, con periodos de los espectros marcados pero de bajo aporte espectral por parte del fondo marino en comparativa al aporte de la fuente tsunamigénica.

Finalmente del análisis se puede apreciar que los resultados obtenidos de los espectrogramas de $W_t(t)$ resultan tener un comportamiento coincidente con los resultados de función de admitancia obtenidos por Mauricio Díaz (2022). La función de admitancia estimada por Díaz (2022) representa el cambio espectral del tsunami en aguas profundas hasta aguas someras. Considerando que se utilizaron métodos distintos para obtener espectrogramas que presentan un comportamiento similar se concluye que el espectro fuente del sismo y el espectro del tsunami en aguas profundas son similares, esto se valida con la teoría lineal de oleaje que señala que las olas en aguas profundas no sienten el fondo entonces no se ven afectadas desde su lugar de origen.

6.2 Análisis de la fuente tsunamigénica

Considerando el ordenamiento de los escenarios para la fuente, se aprecia un patrón de comportamiento en los casos más energéticos el cual está relacionado la distribución y magnitud de la deformación, el patrón observado indica que los escenarios con una alta concentración de las deformaciones máximas en un área pequeña en el mapa generan los escenarios de mayor potencial energético. En el punto 9.4 de Anexos se presentan los casos más destacados para cada grupo de deformación.

Respecto a los resultados, la deformación máxima y el promedio de deformaciones son factores con un nivel de relevancia en el cálculo de S_b , aun así el análisis demuestra que estos factores no son los más influyentes en la clasificación. Un ejemplo para demostrar aquello se presenta observan los escenarios 329 y 341 de magnitud M_w 9.2 donde las deformaciones máximas son 13.21 [m] y 6.43 [m] respectivamente, mientras que su S_b es $1.17 \cdot 10^6$ [m²·s²] y $1.65 \cdot 10^6$ [m²·s²] respectivamente.

Se aprecia que existe una diferencia considerable de deformación máxima entre ambos casos pero aun así el caso 341 tiene un mayor S_b que el caso 329, lo cual lleva a concluir que la concentración de tal deformación en un área pequeña y concentrada genera un sismo más energético y es más influyente que la magnitud de la deformación.

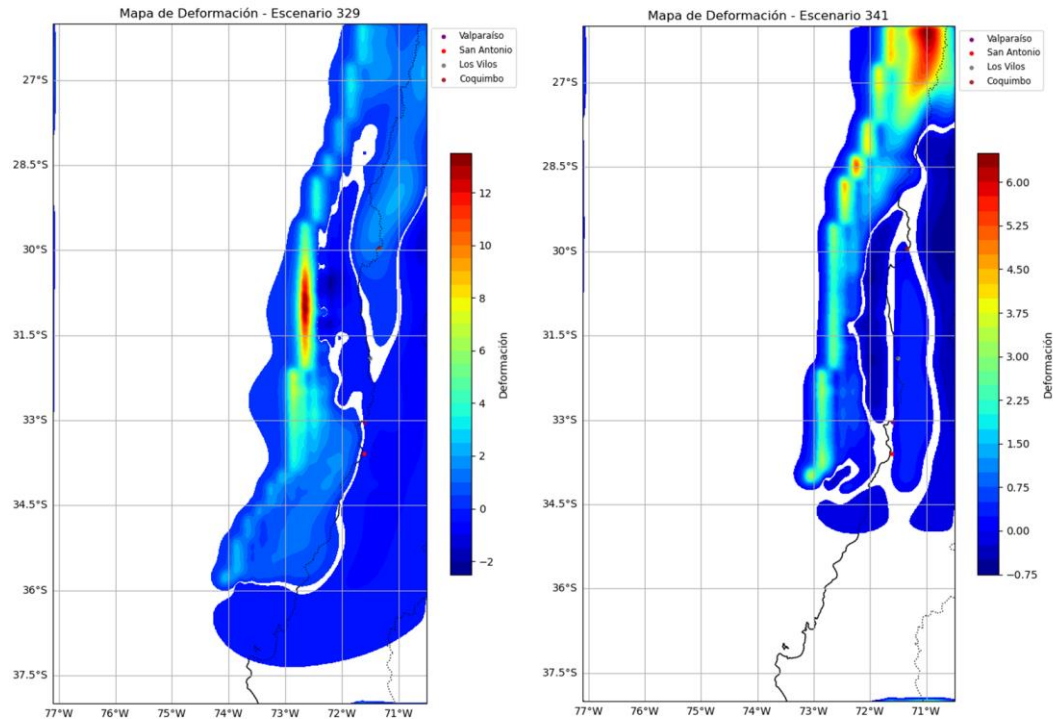


Figura 6-1: Escenarios 329 y 341. Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente se existen escenarios que presenta una variación significativa de posicionamiento en su clasificación a medida que cambia la banda de análisis, estos escenarios tienen como característica particular que poseen un área alargada con las deformaciones máximas o múltiples áreas con una concentración de la deformación máxima. Ejemplo de aquello son el escenario 333, el cual en la banda N°1 estaba en la posición N° 11 y en la banda N°4 está en la posición N°35, o el caso 230 que en la banda N°1 tiene la posición N° 3 y en la banda N°4 tiene la posición N°26. Por su parte los escenarios con deformaciones concentradas en un área pequeña como por ejemplos los escenarios 44, 136 o 265 suelen estar presentes como eventos energéticos en todas las bandas de análisis.

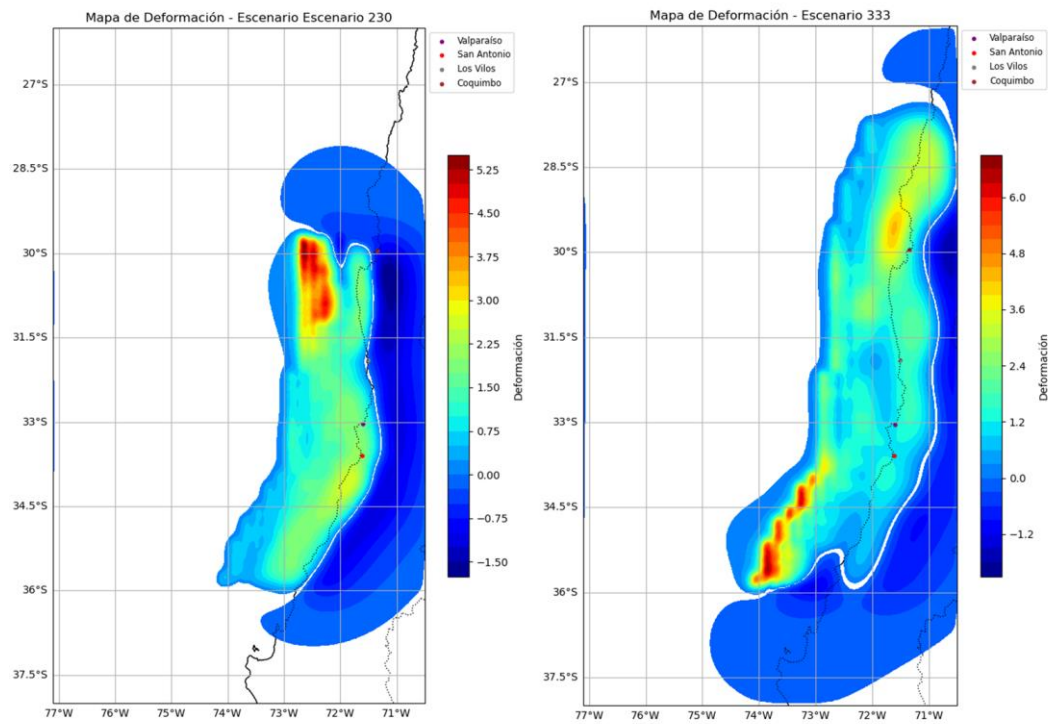


Figura 6-2: Escenarios 230 y 333. Fuente: Elaboración propia.

Pese a tener una mayoría de casos que coinciden en sus características y cualidades energéticas, existen escenarios particulares que no siguen el patrón establecido. Ejemplo de ello son los escenarios 57 y 118. Estos escenarios presentan la mayor deformación en sus respectivas magnitudes (M_w 8.7 y M_w 8.8) y presentan un área de deformación concentrada, aun así en la clasificación por S_b no aparentan dentro del grupo de casos más energéticos (primer cuartil).

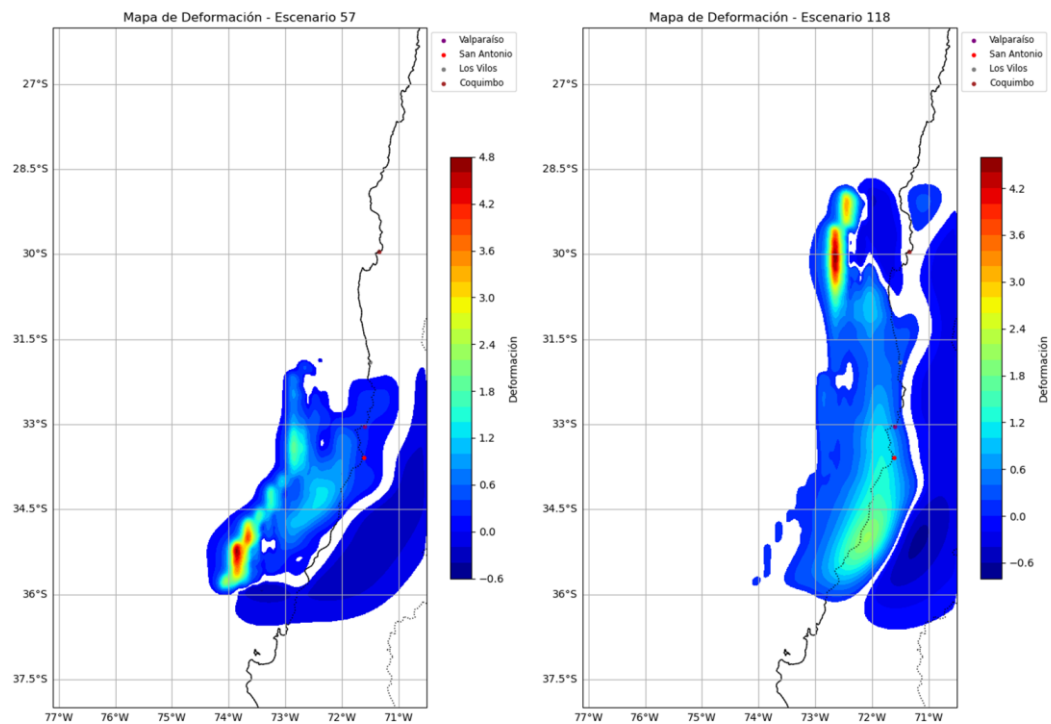


Figura 6-3: Escenario 57 y 118. Fuente: Elaboración propia.

Pese a estos escenarios particulares que pueden generar afectar la confiabilidad del modelo de comportamiento descubierto, se establece que generalmente los casos más energéticos muestran un patrón coincidente. Se establece al factor de concentración de las deformaciones como el factor más influyente en la energía del sismo ya que mientras más concentrada se encuentren las deformaciones máximas más energético será el evento mediante el criterio de S_b . Adicionalmente estos casos suelen destacar en gran parte de las bandas de periodo analizado, a diferencia de escenarios con áreas de ruptura alargadas donde destacaban mayormente en los primeros periodos de análisis. Análogamente los casos menos energéticos están relacionados a un factor de distribución de la deformación y a la magnitud de tales deformaciones, mientras mayor distribución exista y mientras menor sean las deformaciones, el sismo será menos energético.

6.3 Relación fuente versus tsunami

6.3.1 Valparaíso

Analizando los escenarios de Valparaíso se aprecia un modelo de comportamiento para los casos más energéticos, relacionado con la concentración de las deformaciones máximas en un área reducida, esta característica coincide con los resultados del análisis de la fuente tsunamigénica. Considerando que Valparaíso tiene ciertas características de bahía no resonante es razonable señalar que hay una concordancia entre las características del sismo y la energía del tsunami.

Adicionalmente cabe señalar que la ubicación del centroide de deformaciones es un factor relevante en el comportamiento del tsunami en costa. Esto se puede comprobar con escenarios como el 36, 52 o 136 donde el análisis de la fuente indica que son casos muy energéticos, pero al tener un área de deformaciones alejada de Valparaíso no figuran en los escenarios más energéticos de esta bahía. Inclusive, a partir del análisis de los escenarios se puede observar que los casos ubicados en el norte de Valparaíso en un rango de latitud entre -30° a -33.5° suelen ser los escenarios más energéticos, por lo tanto la direccionalidad del sismo puede ser un factor relevante en su inferencia en el tsunami, como lo señala la investigación realizada por Benjamín Díaz (2019), dado que los tsunamis provenientes desde el norte suelen ser más energéticos que los originados en el sur de Valparaíso. A continuación en la Figura 6-4 se presentará el área crítica donde estaban los centroides de deformación de los escenarios más energéticos mayoritariamente.

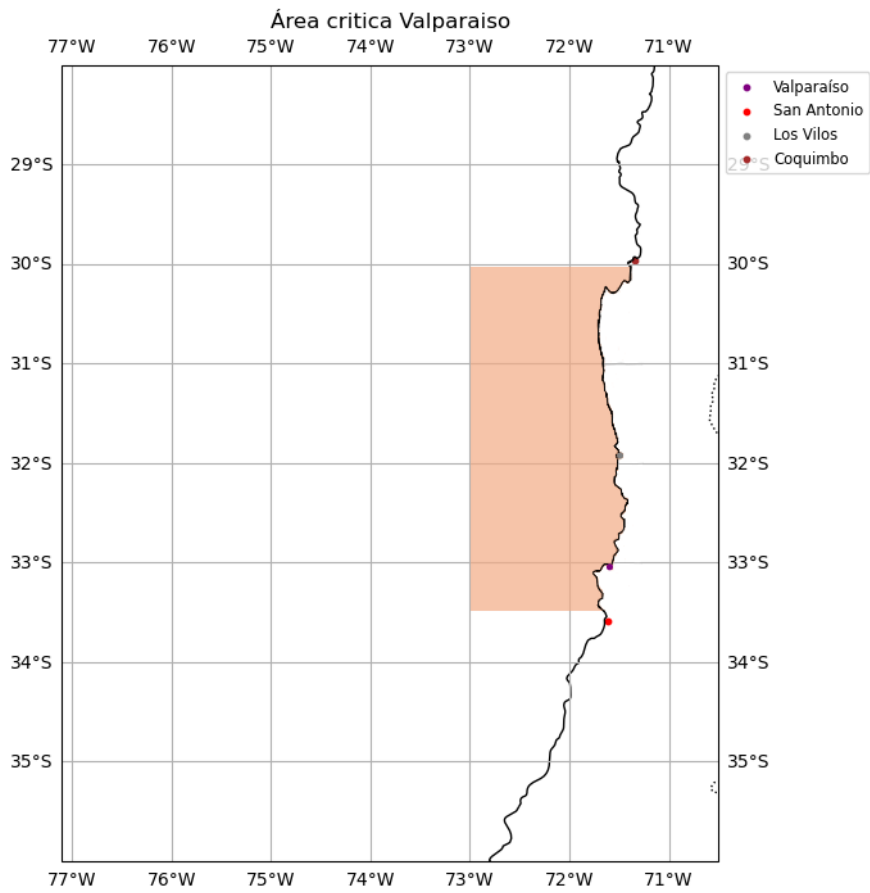


Figura 6-4: Zona de escenarios más energéticos de Valparaíso. Fuente: Elaboración propia.

Para validar la afirmación previa se presentarán los siguientes ejemplos: El escenario 119 presenta 2 áreas concentradas de deformación, una al norte del país y otra con deformaciones cercana a los 2 [m] ubicada en la zona antes señalada, por su parte el escenario 131 tiene un área de deformación concentrada con un valor máximo de 2.98 [m]. El cálculo indica que el escenario 119 presenta un S_b de $3.08 \cdot 10^6 [\text{m}^2 \cdot \text{s}^2]$ mientras que el escenario 131 presenta un S_b de $6.58 \cdot 10^5 [\text{m}^2 \cdot \text{s}^2]$ evidenciando que un escenario en la ubicación en el área crítica puede generar un tsunami mucho más energético en Valparaíso pese a presentar deformaciones menores.

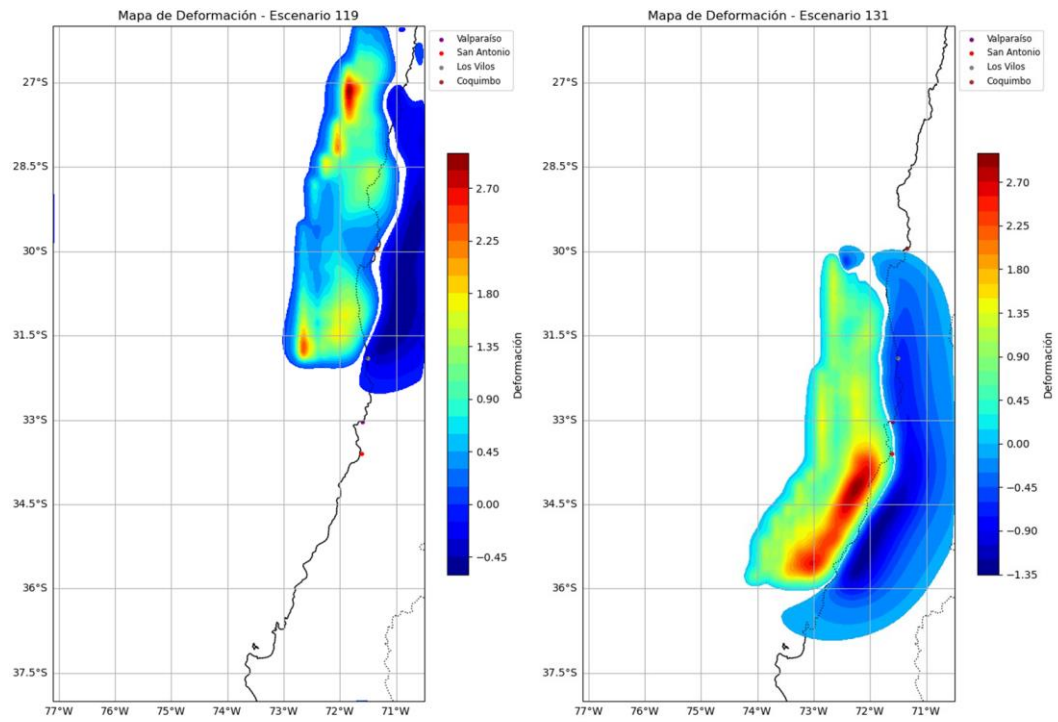


Figura 6-5: Escenarios 119 y 131. Fuente: Elaboración propia.

Caso similar ocurre al comparar los escenarios 276 y 296 donde el primero registra una deformación máxima de 4.73 [m] y un S_b de $9.15 \cdot 10^6$ [m²·s²] mientras que el escenario 296 registra una deformación de 3.8 [m] y S_b de $7.55 \cdot 10^5$ [m²·s²]. Evidenciando un factor en la ubicación del sismo.

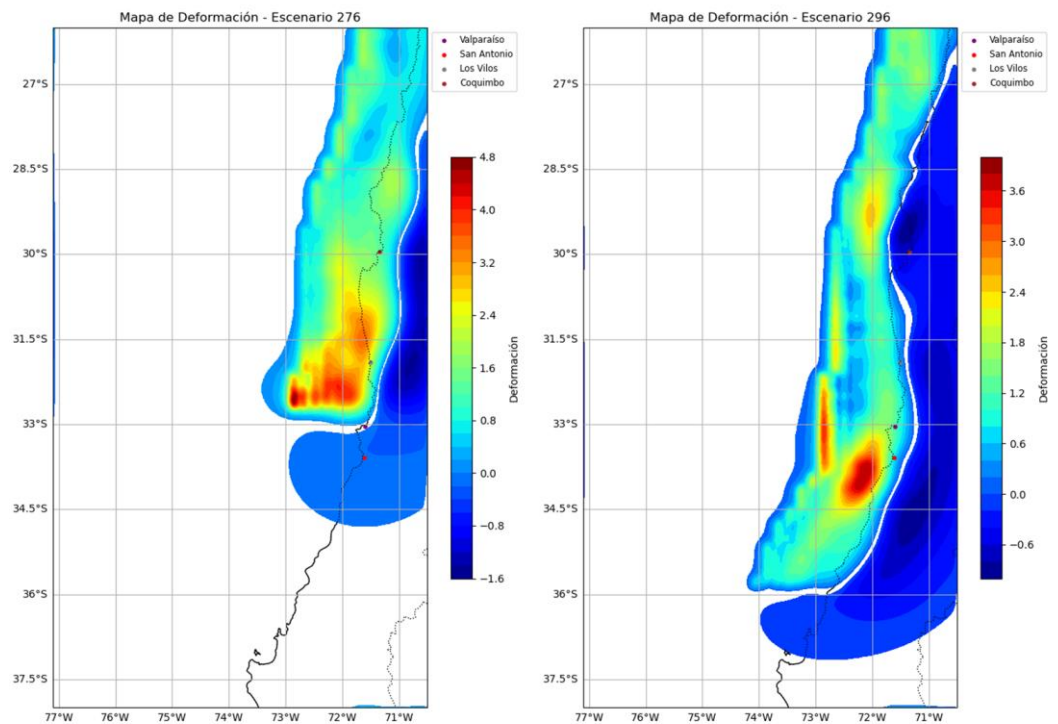


Figura 6-6: Escenarios 276 y 296. Fuente: Elaboración propia.

Respecto al análisis de escenarios entre bandas de periodo, Valparaíso conserva muchos de sus escenarios energéticos en todas las bandas, aun así hay escenarios que se clasifican en los más energéticos solo en las primeras bandas, estos casos particulares se caracterizan por presentar varios puntos con una alta deformación o un área de deformación alargada como se aprecia en la Figura 6-7 con los escenarios 5 y 94. Otro factor relevante para que ciertos escenarios se destaquen más en las primeras bandas que en las últimas, es su cercanía a la costa.

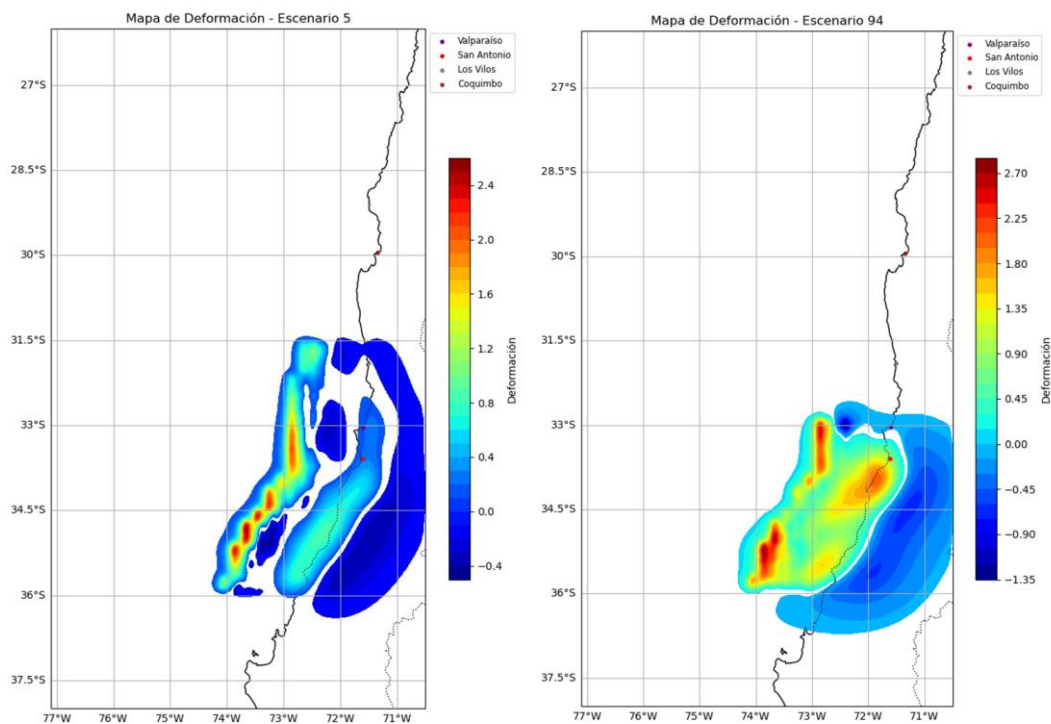


Figura 6-7: Escenarios 5 y 94. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, de los resultados obtenidos se evidencia que la localización y dirección del sismo juega un rol importante en el comportamiento del tsunami en la bahía, se aprecia que hay una zona donde se desarrollan los sismos que generan los tsunamis más energéticos. Respecto al análisis de escenarios menos energéticos, las conclusiones son análogas a lo planteado con los casos más energéticos, el factor que tsunamis pocos energéticos se ve ligado a la magnitud de las deformaciones, a la concentración de tales deformaciones y a la lejanía que tenga el núcleo de deformaciones máximas a la bahía de Valparaíso.

6.3.2 San Antonio

A partir del análisis se infiere que el factor de concentración de deformaciones en un área es importante en los tsunamis de San Antonio, dado que los escenarios más energéticos tienden a tener un área de deformaciones máximas concentrada. Este fenómeno se respalda de las conclusiones anteriores que señalan que San Antonio es una bahía que depende de las características de la fuente por sobre el aporte de la batimetría, entonces es coherente que este factor observado en el análisis de la fuente tsunamigénica se aprecie también en el análisis de San Antonio.

Otro factor relevante es la localización del sismo, dado que se aprecia que la gran mayoría de escenarios energéticos tiene su foco de deformaciones máximas entre una latitud de -33° y -34.5° , por lo que a partir del análisis se concluye que los tsunamis provenientes desde el sur de San Antonio son muchos más energéticos que los provenientes del norte.

Otro factor asociado a la ubicación es la lejanía del sismo a la bahía de estudio, es decir mientras más alejado este centroide de deformaciones a la bahía menor será la energía en el tsunami debido a la dispersión de energía de las olas a medida que se desplazan hasta la bahía de estudio. Esto se puede apreciar en escenarios donde se presenta un área concentrada con la deformación máxima pero en la zona norte del país, generando que un escenario muy energético en el análisis de fuente no represente un caso de los más energéticos en un tsunami en San Antonio. A continuación se presentará un mapa con la zona crítica donde están los escenarios de mayor energía en San Antonio.

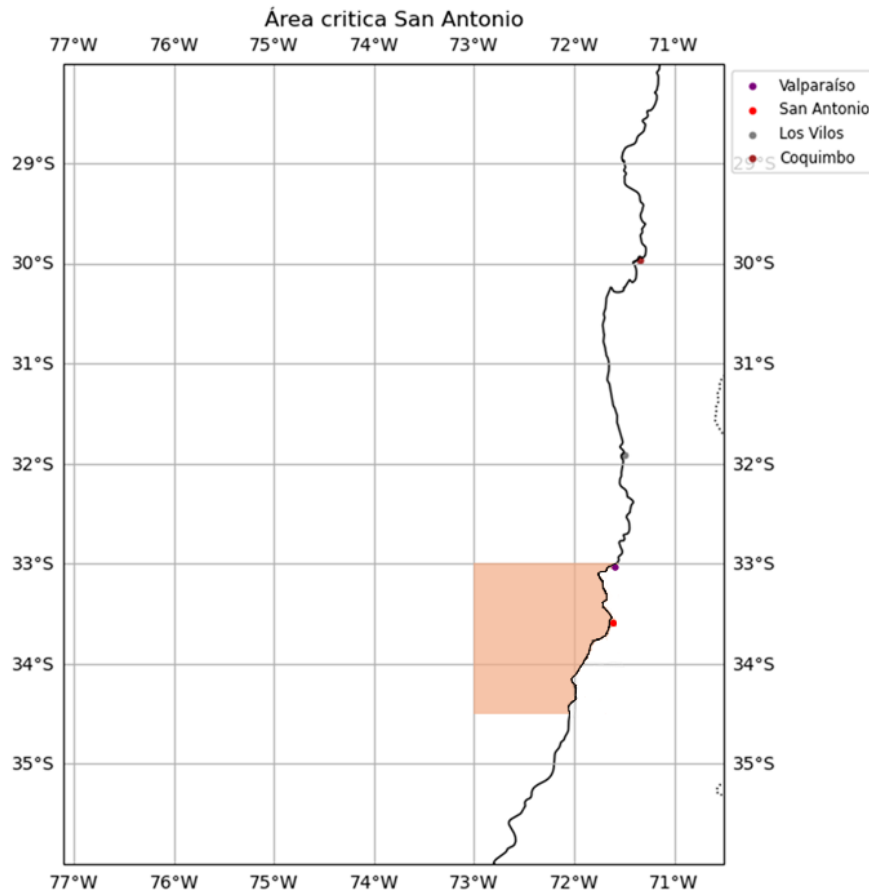


Figura 6-8: Zona de escenarios más energéticos de San Antonio. Fuente: Elaboración propia.

Para corroborar la importancia de la localización de las deformaciones en la incidencia de la bahía se presentará el escenario 94 el cual registra una concentración de deformación cerca del sur de San Antonio de una magnitud de 1.5 [m] aproximadamente, y se comparará con el escenario 79 el cual es de los escenarios de mayor deformación registrada en el grupo de estudio de M_w 8.7. Al analizar el factor energético de cada uno, el caso 94 registra un S_b de $2.21 \cdot 10^6$ [$m^2 \cdot s^2$] siendo el tercer escenario más energético de su banda de análisis, mientras que el escenario 79 registra un S_b inferior de $1.23 \cdot 10^6$ [$m^2 \cdot s^2$] pese a ser un caso con mayor deformación y que en el análisis de la fuente está clasificado como un caso más energético que el 94.

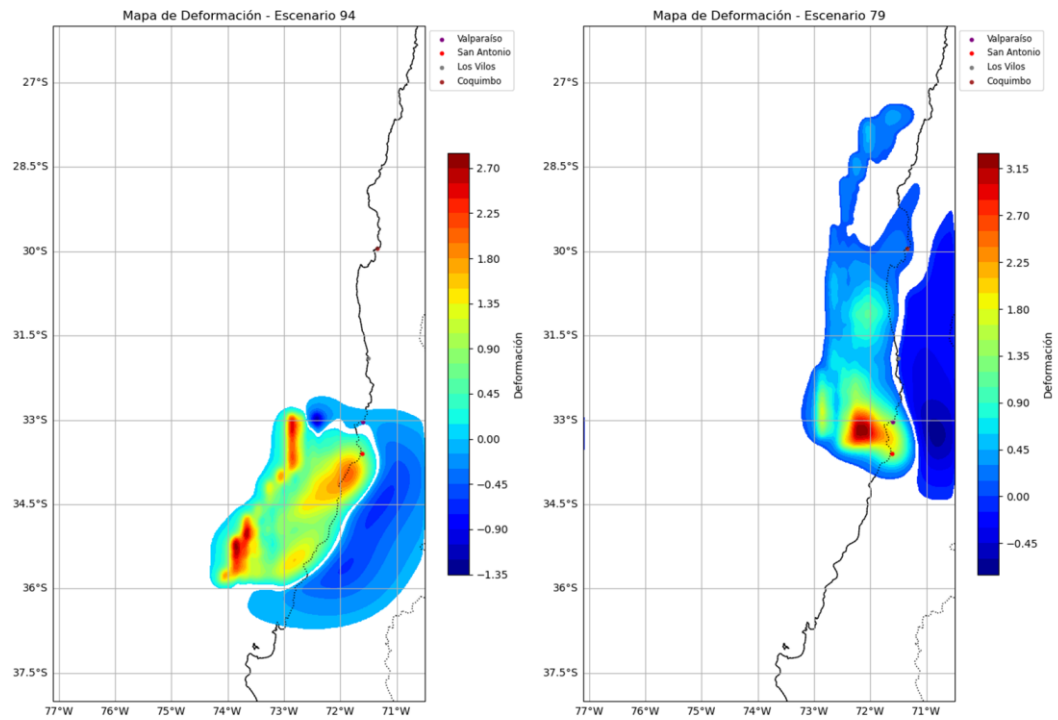


Figura 6-9: Escenarios 79 y 94. Fuente: Elaboración propia.

Otro ejemplo para corroborar la importancia de la ubicación y la direccionalidad de un evento sísmico sobre el tsunami en San Antonio son los casos 23 y 197. Ambos se caracterizan por tener un rango de deformaciones similares y de agrupar su mayor deformación en un área concentrada, aun así el escenario 23 registra un S_b de $7.62 \cdot 10^6 \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^2]$ y el escenario 197 un S_b de $4.23 \cdot 10^6 \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^2]$ lo cual indica que el caso 23 es más energético posiblemente por un factor de ubicación.

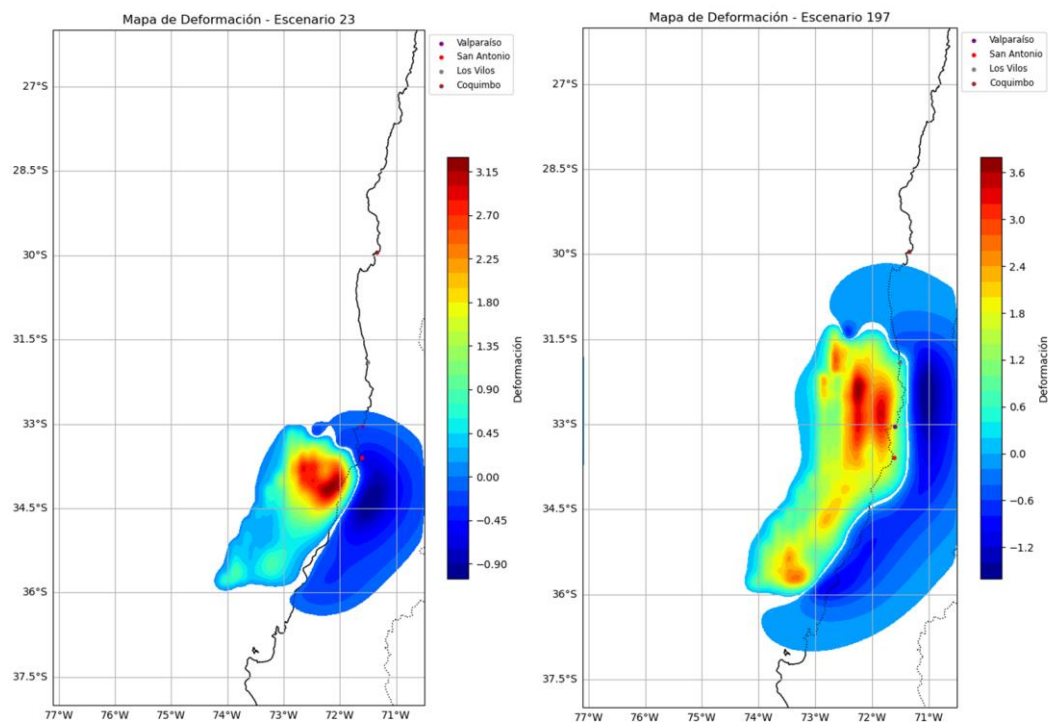


Figura 6-10: Escenarios 23 y 197. Fuente: Elaboración propia.

Caso similar se observa comparando los escenarios 166 y 208 los cuales presentan características parecidas en cuando a la distribución de deformación y los órdenes de magnitud de tales deformaciones, aun así si comparamos sus S_b el escenario 166 tiene un valor de $1.01 \cdot 10^7 \text{ [m}^2\cdot\text{s}^2\text{]}$ y el escenario 208 un valor de $6.18 \cdot 10^5 \text{ [m}^2\cdot\text{s}^2\text{]}$ reflejando que el escenario 166 tiene mayor impacto energético en los resultados de San Antonio.

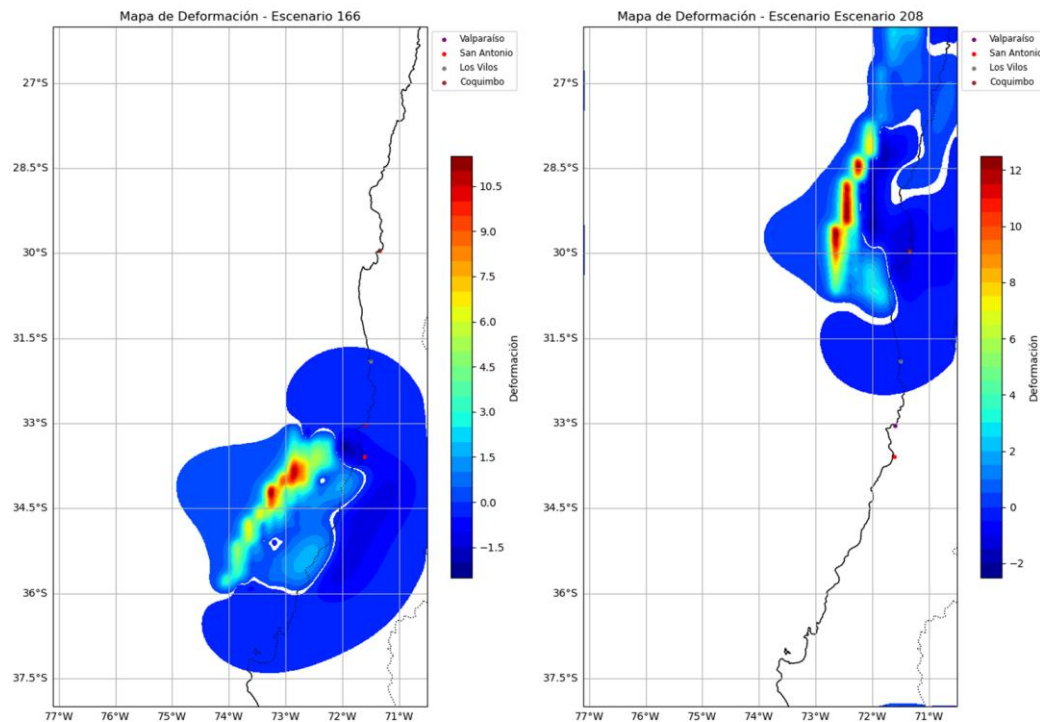


Figura 6-11: Escenarios 166 y 208. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el análisis de fuente, se presentan escenarios con la característica de estar clasificados en las primeras ubicaciones en la primera banda de análisis pero a medida que se analizan bandas de mayor periodo estos casos no destacan en la clasificación. La característica de estos escenarios corresponde a tener un área de deformación alargada o con varios puntos de deformación máxima, similar a lo observado en el análisis de fuente. A continuación se presentarán algunos escenarios destacados.

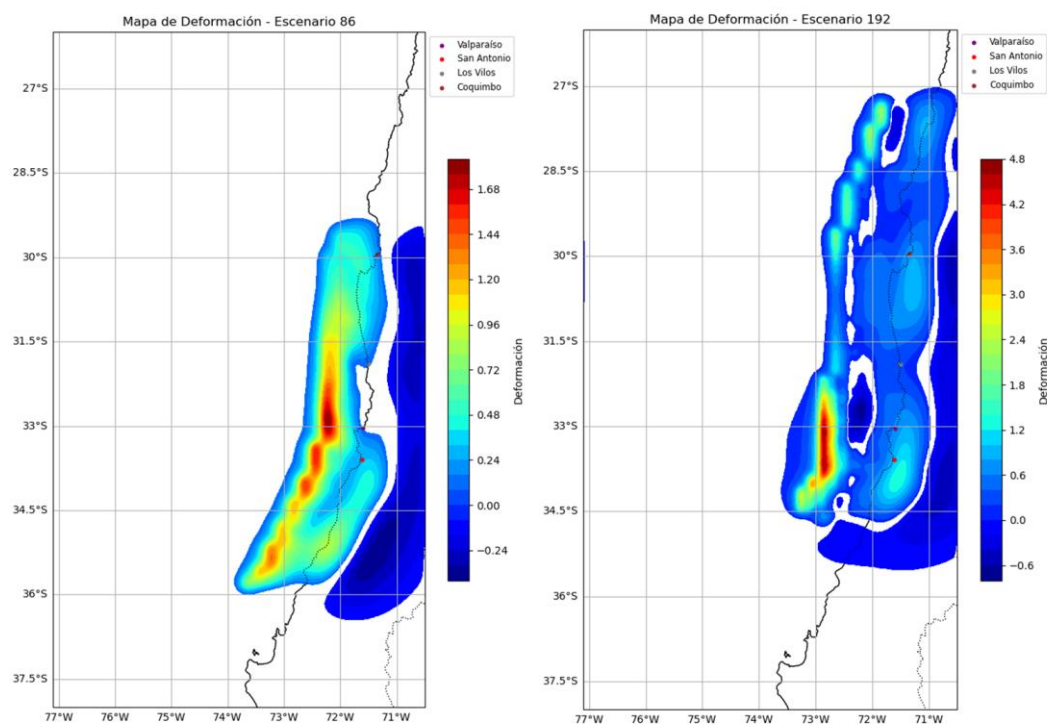


Figura 6-12: Escenarios 86 y 192. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto en San Antonio se concluye que la concentración de la deformación en áreas pequeñas es un factor relevante en la energía de los tsunamis en la bahía, similar a lo concluido en el análisis de la fuente, compartiendo una alta dependencia entre el tsunami y fuente en San Antonio. Adicionalmente se concluye que la localización del evento sísmico es un factor relevante en la incidencia del tsunami en San Antonio, para los casos más energéticos se evidencia que los eventos cercanos al sur de la bahía tienen alta relevancia en la energía del tsunami.

Benjamín Díaz (2019) dentro de sus conclusiones se señala que San Antonio corresponde a una bahía que no se ve afectada por la direccionalidad, a partir de los resultados obtenidos de esta investigación se concluye que San Antonio si se ve afectado por la ubicación y direccionalidad del sismo. La diferencia de conclusiones se puede dar debido a que la investigación anterior usó terremotos reales para el estudio, la cantidad de eventos reales registrados son escasos para un análisis de patrón de comportamiento, en cambio los resultados simulados son bastantes y se puede observar cierto patrón e influencia de la dirección del sismo.

Finalmente para los casos menos energéticos existen dos factores importantes, la distribución de deformaciones y la lejanía del centroide de deformaciones respecto a la bahía, un área de deformaciones más dispersa genera tsunamis de menor energía y la distancia entre el sismo y la bahía infiere en la dispersión de energía que puedan tener las olas durante su viaje hacia la costa.

7 Conclusiones

Mediante el desarrollo de la investigación ha sido posible estimar ciertas características influyentes de la fuente que infieren en el comportamiento de los tsunamis en las bahías de Valparaíso y San Antonio. Gracias a los métodos de clasificación se estableció un ordenamiento de datos mediante un criterio de energía usando el área bajo la curva de los espectros de tsunamis y con ello se obtienen patrones de comportamiento entre fuente y tsunami para ambas bahías.

Aun así es importante señalar que el método utilizado puede contener errores, en primer lugar, dado que la investigación consistía en un análisis de data se confía en la representatividad de las simulaciones calculadas previamente. Además para el desarrollo de ciertos cálculos se realizaron procedimientos que pueden afectar esta representatividad de los datos. El ejemplo de esto es la utilización de una interpolación lineal para los datos de espectros de deformación en el método del módulo en el análisis de la fuente, este método de interpolación tiene la ventaja que es de cálculo rápido, pero a su vez puede llevar a resultados imprecisos, la interpolación lineal se podría ver afectada por la característica oscilante de las señales obtenidas de la FFT. Por lo que se debe considerar este factor en el análisis de la fuente tsunamigénica y para futuros análisis de fuente donde se aplique el método del módulo, se recomienda utilizar algún método más sofisticado de interpolación.

A partir del análisis de la fuente tsunamigénica se concluyó que la concentración de deformaciones en áreas reducidas generaba eventos más energéticos, principalmente en la banda N°4, donde están periodos más elevados, además se aprecia que existen escenarios con un área de deformación alargada o con múltiples áreas concentradas que se caracterizaban por destacar solamente en la banda N°1. Estas observaciones no coinciden con lo señalado en la fórmula de Merian, que señala que el largo de ruptura es directamente proporcional al periodo fundamental. De los resultados se aprecia que los casos de falla más alargada tienden a destacar en periodos más bajos mientras que las áreas de deformación muy concentradas se destacan en periodos más altos. Aun así cabe señalar que no se estimó un largo de ruptura cuantitativo para cada sismo, se concluye que la fórmula de Merian no parece aplicable en Valparaíso y San Antonio por criterios de observación y clasificación de datos, aun así esta conclusión concuerda con lo señalado por Benjamín Díaz (2019) donde si se realizó un análisis cualitativo a partir de sismos reales.

En resumen para ambas bahías es influyente que los sismos tengan ruptura somera, ósea bajo el mar, además se puede establecer que la concentración de la deformación es un factor relevante en el comportamiento de un sismo y en los tsunamis que se pueden generar en las bahías de características no resonantes como son Valparaíso y San Antonio. También se concluye que la localización de las mayores deformaciones del sismo es un factor influyente en el tsunami y tanto Valparaíso como San Antonio tienen una área específica donde se presentan los terremotos generadores de los tsunamis más energéticos, por parte de Valparaíso se observa un patrón que indica que sismos provenientes del norte de la bahía son los más energéticos, mientras que para San Antonio los resultados sugieren que los sismos ubicados al sur de esta bahía son los sismos generadores de los tsunamis de mayor energía.

A partir de la presente investigación es posible obtener información del comportamiento de dos bahías de gran relevancia en el país, Valparaíso-Viña del Mar y San Antonio, dado que cuentan con una gran actividad portuaria y una alta densidad poblacional en zonas de inundación, por lo tanto conocer ciertas características de los tsunamis reduce la incertidumbre y permite entregar más herramientas para la toma de decisiones respecto a la gestión de mitigación de daños y pérdidas ante este tipo de catástrofes, como por ejemplo en el sistema de evacuación para la ciudadanía en caso de tsunamis.

Finalmente se sugiere que para aumentar la validez de estos resultados se pueden realizar más simulaciones de tsunamis para observar si siguen presentándose los patrones de ubicación de los sismos.

8 Referencias

1. Aguilera Carvajal, V. I. (2021). *Análisis de Sensibilidad en la Respuesta Resonante de Bahías de Chile al Rol de la Fuente Tsunamigénica*. Universidad Técnica Federico Santa María.
2. Aranguiz, R., Catalán, P. A., Cecioni, C., Bellotti, G., Henriquez, P., & González, J. (2019). Tsunami Resonance and Spatial Pattern of Natural Oscillation Modes With Multiple Resonators. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(11), 7797-7816. <https://doi.org/10.1029/2019JC015206>
3. Carvajal, M., Cisternas, M., & Catalán, P. A. (2017). 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*, 122(5), 3648-3660. <https://doi.org/10.1002/2017JB014063>
4. Catalán, Patricio. A., Aránguiz, R., González, G., Tomita, T., Cienfuegos, R., González, J., Shrivastava, M. N., Kumagai, K., Mokrani, C., Cortés, P., & Gubler, A. (2015). The 1 April 2014 Pisagua tsunami: Observations and modeling: PISAGUA TSUNAMI: DATA AND MODELING. *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2918-2925. <https://doi.org/10.1002/2015GL063333>
5. Cortés, P., Catalán, P. A., Aránguiz, R., & Bellotti, G. (2017). Tsunami and shelf resonance on the northern Chile coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(9), 7364-7379. <https://doi.org/10.1002/2017JC012922>
6. Díaz Núñez, B. I. (2019). *ANÁLISIS DE LA PREPONDERANCIA DEL TSUNAMI RESPECTO A LOS EFECTOS LOCALES*. Universidad Técnica Federico Santa María.
7. Díaz Rojas, M. A. (2022). *ROL DE LA BATIMETRÍA EN LAS PROPIEDADES RESONANTES DE LA COSTA DE CHILE ANTE VARIACIONES EN LA FUENTE TSUNAMIGENICA*. Universidad Técnica Federico Santa María.
8. LeVeque, R. J., Waagan, K., González, F. I., Rim, D., & Lin, G. (2016). Generating Random Earthquake Events for Probabilistic Tsunami Hazard Assessment. *Pure and Applied Geophysics*, 173(12), 3671-3692. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1357-1>
9. Macías, J., Castro, M. J., Ortega, S., Escalante, C., & González-Vida, J. M. (2017). Performance Benchmarking of Tsunami-HySEA Model for NTHMP's Inundation Mapping Activities. *Pure and Applied Geophysics*, 174(8), 3147-3183. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1583-1>
10. Melgar, D., LeVeque, R. J., Dreger, D. S., & Allen, R. M. (2016). Kinematic rupture scenarios and synthetic displacement data: An example application to the Cascadia subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9), 6658-6674. <https://doi.org/10.1002/2016JB013314>
11. Okada, Y. (1985). *SURFACE DEFORMATION DUE TO SHEAR AND TENSILE FAULTS IN A HALF-SPACE*.
12. Pablo Cortés & Patricio Catalán. (2016). *ATLAS DE RESONANCIA DE TSUNAMI*. CIGIDEN.
13. Rabinovich, A. B. (1997). Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C6), 12663-12676. <https://doi.org/10.1029/97JC00479>
14. Rabinovich, A. B. (2009). Seiches and Harbor Oscillations. En *Handbook of Coastal and Ocean Engineering: Vol. Chapter 9*.
15. Yamazaki, Y., & Cheung, K. F. (2011). Shelf resonance and impact of near-field tsunami generated by the 2010 Chile earthquake: RESONANCE OF THE 2010 CHILE TSUNAMI. *Geophysical Research Letters*, 38(12), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011GL047508>

9 Anexos

9.1 Análisis de Fuente

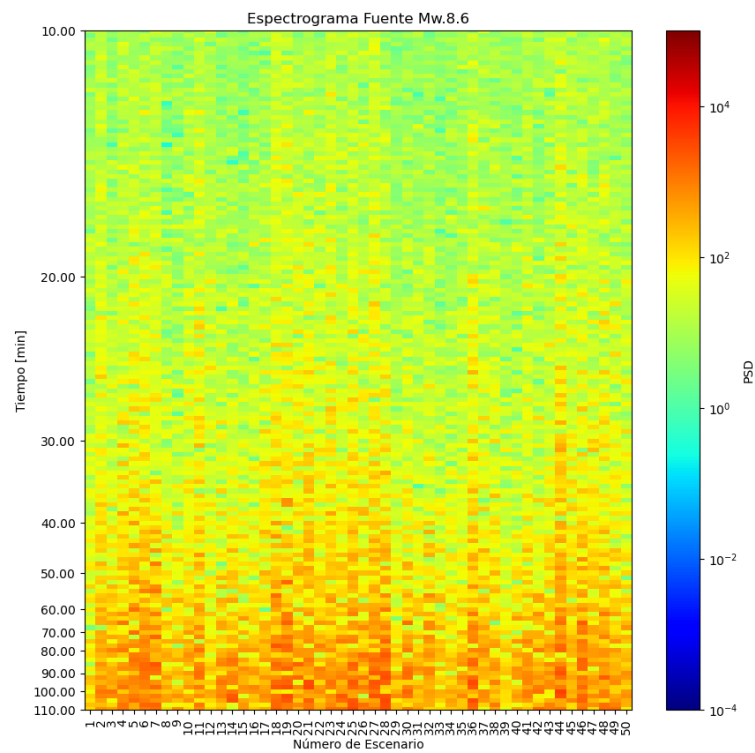


Figura 9-1: Espectrograma de fuente, magnitud Mw 8.6. Fuente: Elaboración propia.

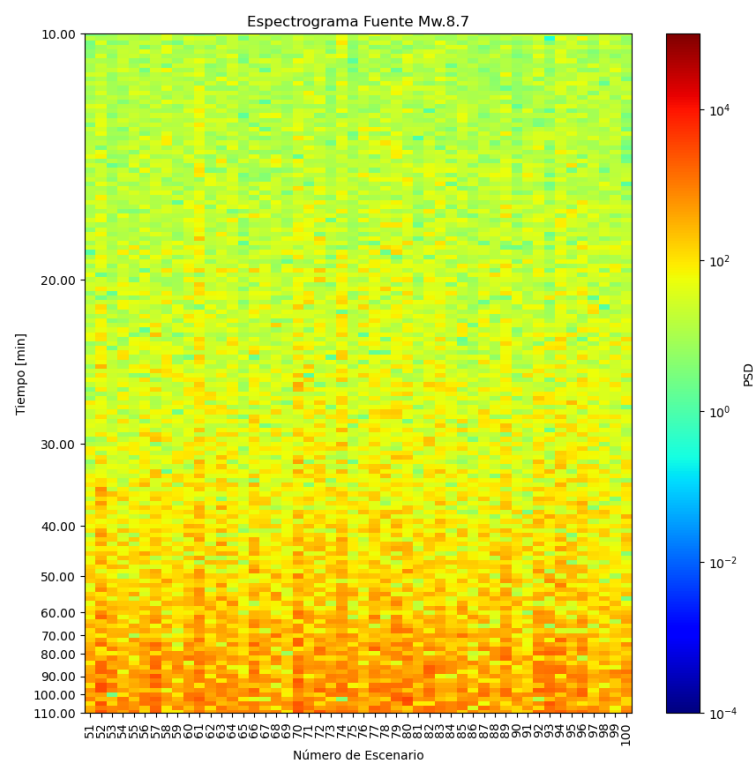


Figura 9-2: Espectrograma de fuente, magnitud Mw 8.7. Fuente: Elaboración propia.

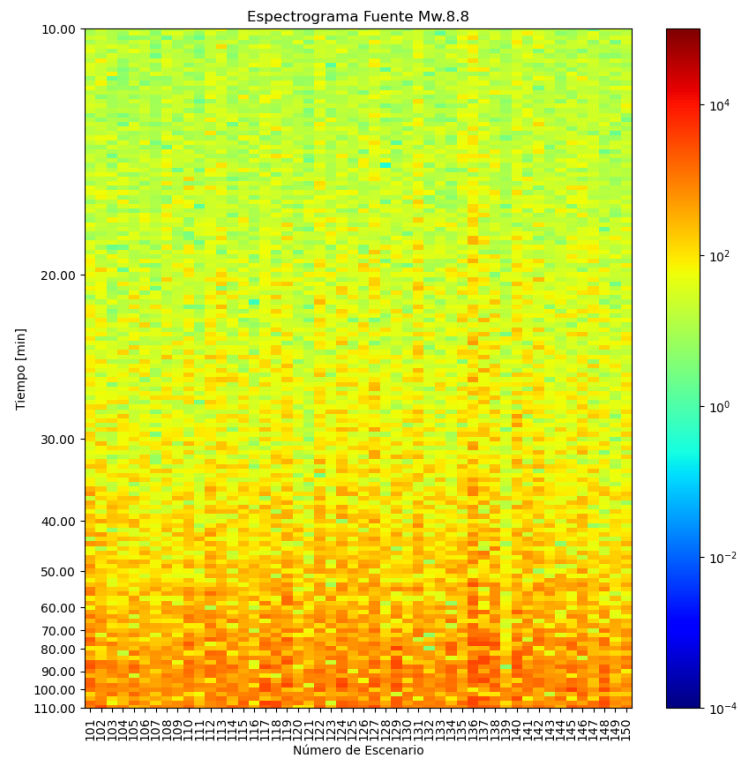


Figura 9-3: Espectrograma de fuente, magnitud Mw 8.8. Fuente: Elaboración propia.

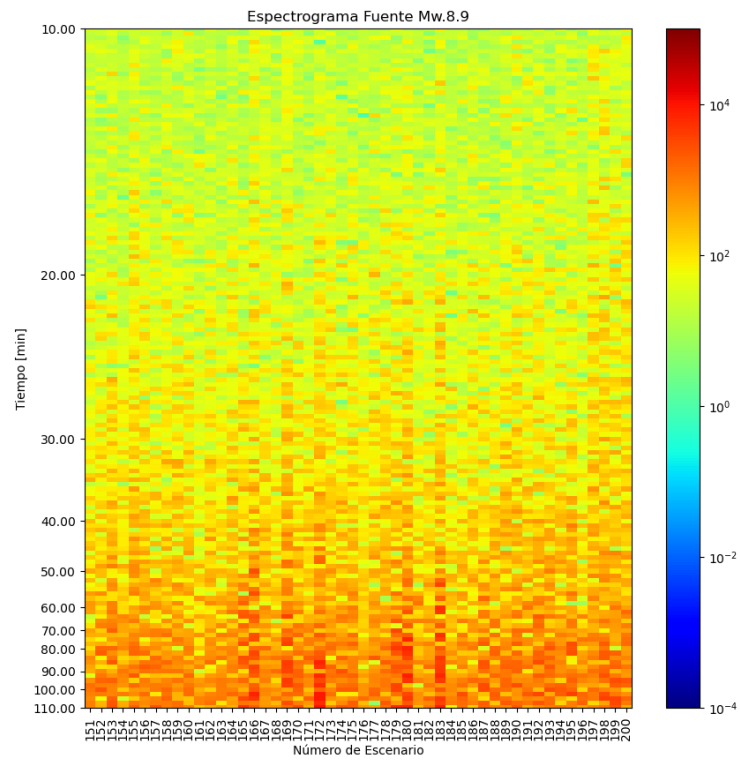


Figura 9-4: Espectrograma de fuente, magnitud Mw 8.9. Fuente: Elaboración propia.

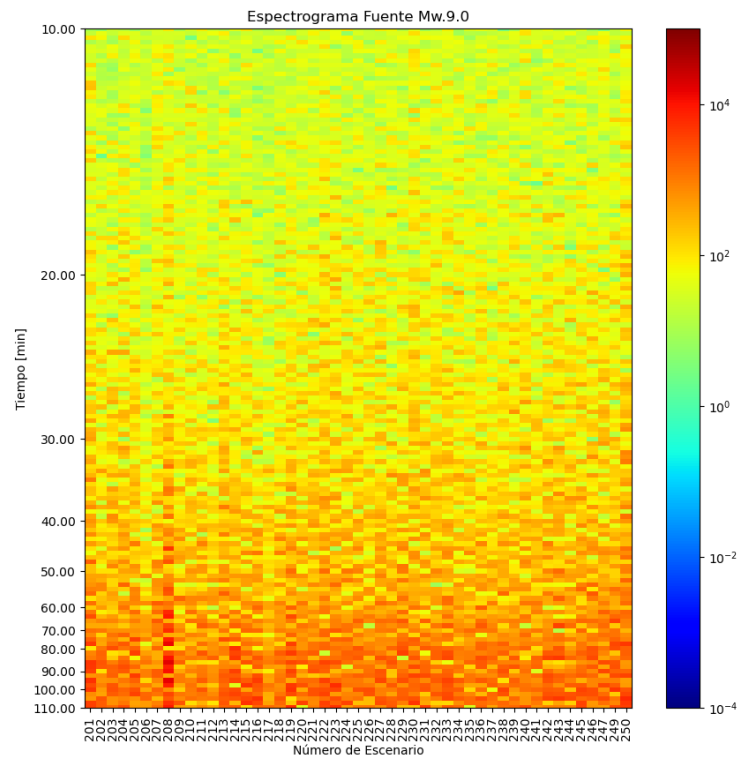


Figura 9-5: Espectrograma de fuente, magnitud Mw 9.0. Fuente: Elaboración propia.

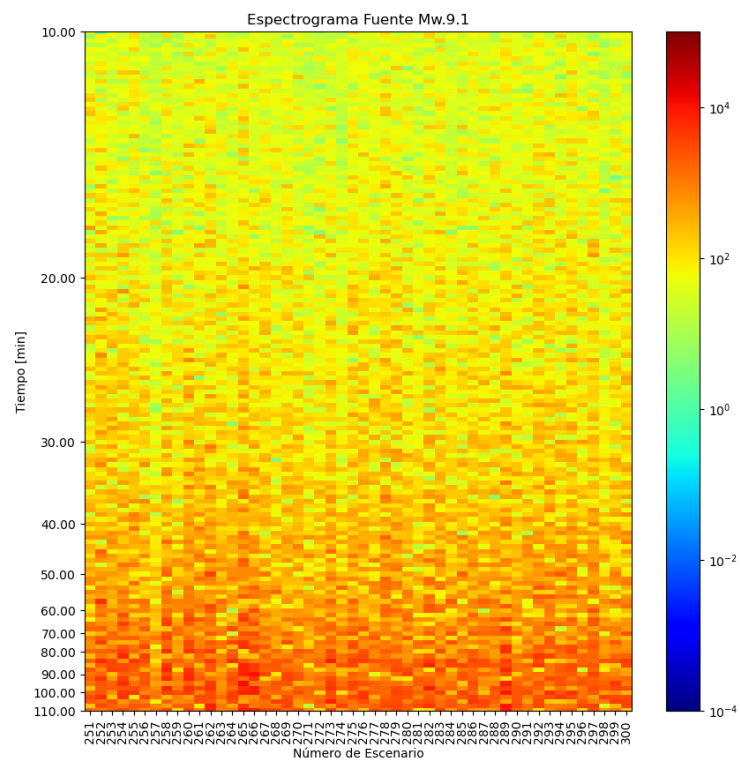


Figura 9-6: Espectrograma de fuente, magnitud Mw 9.1. Fuente: Elaboración propia.

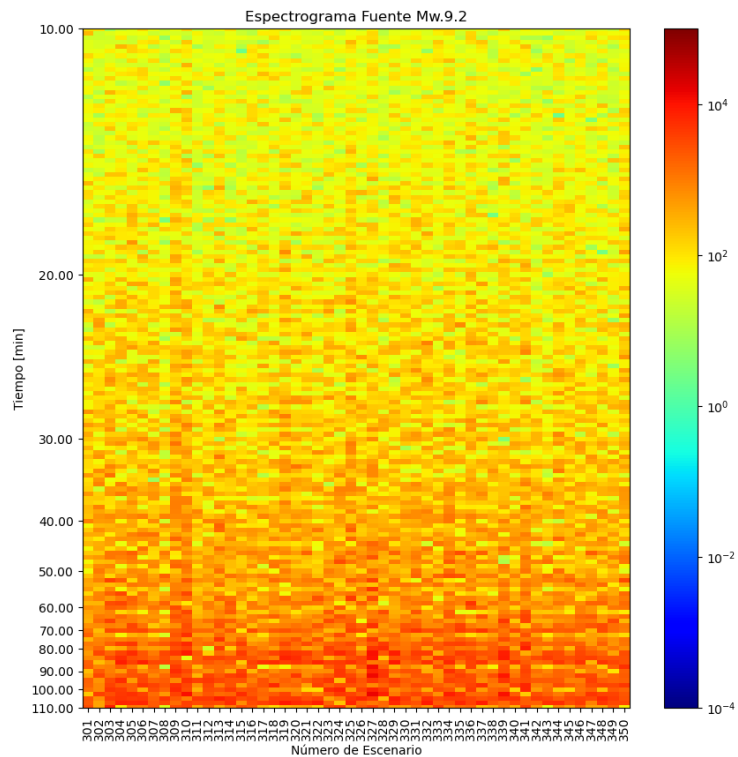


Figura 9-7: Espectrograma de fuente, magnitud Mw 9.2. Fuente: Elaboración propia.

9.2 Análisis de Tsunamis

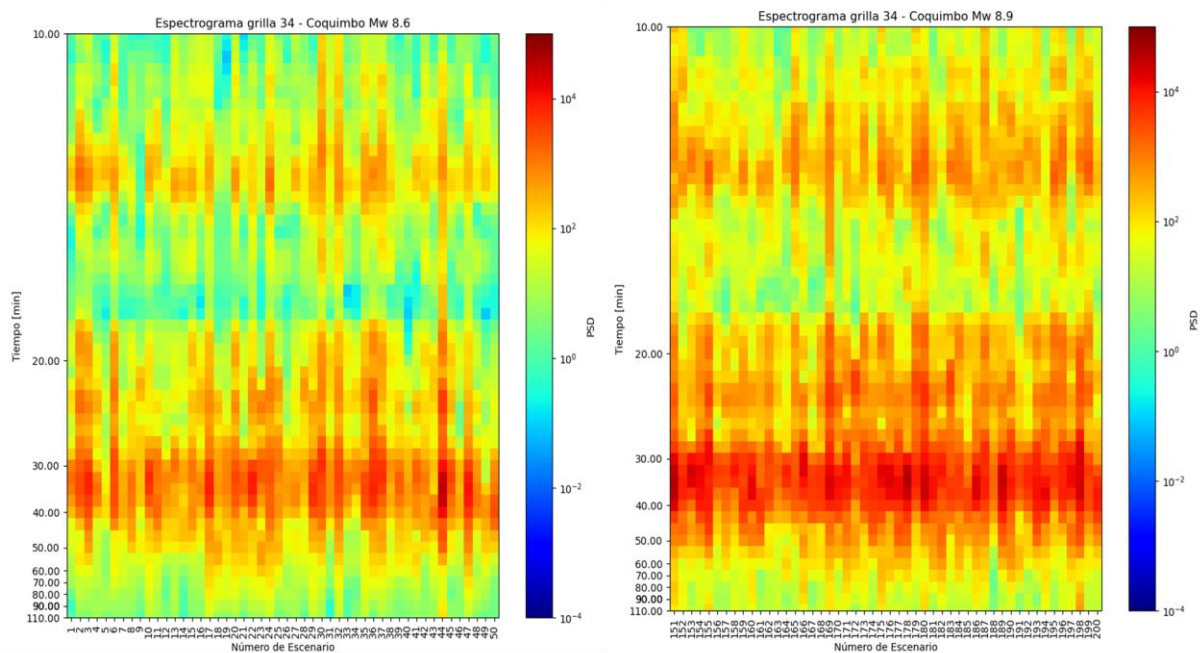


Figura 9-8: Espectrograma de Coquimbo, magnitud Mw 8.6 y Mw 8.9. Fuente: Elaboración propia.

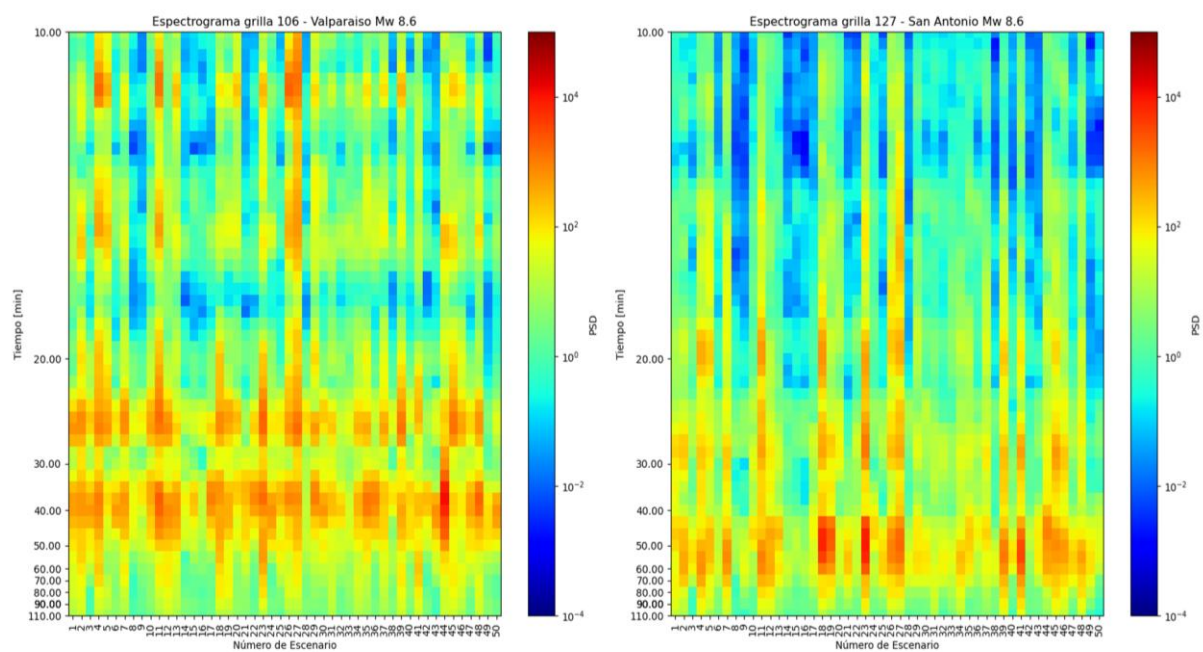


Figura 9-9:Espectrograma de Valparaíso y San Antonio, magnitud Mw 8.6. Fuente: Elaboración propia.

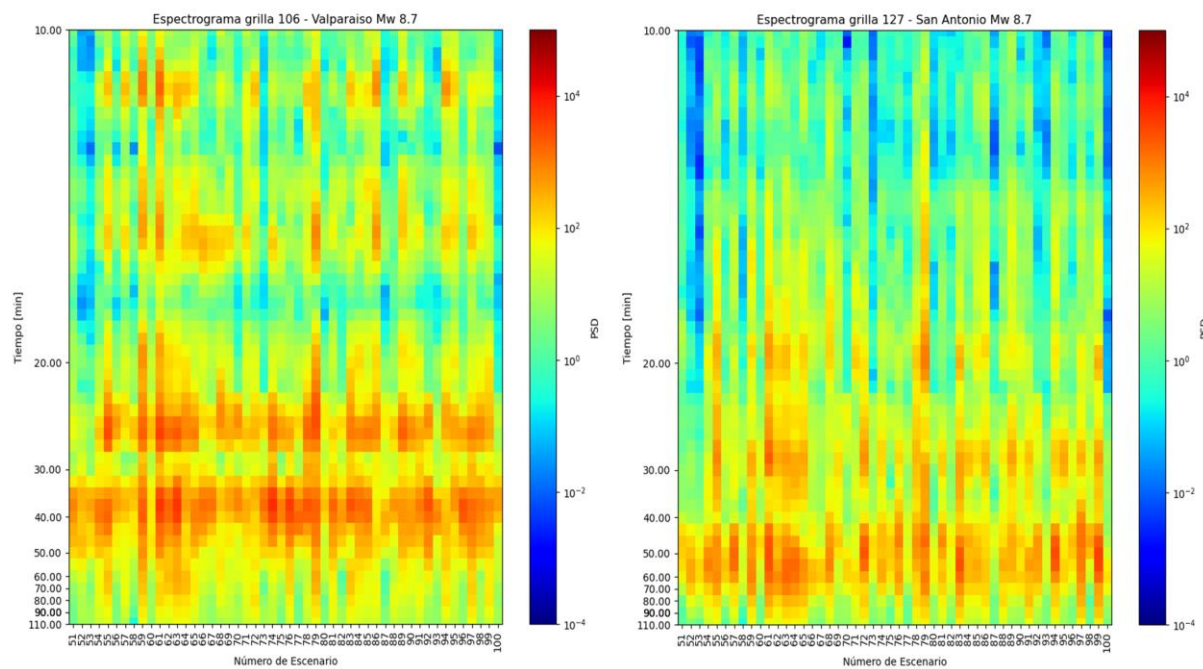


Figura 9-10: Espectrograma de Valparaíso y San Antonio, magnitud Mw 8.7. Fuente: Elaboración propia.

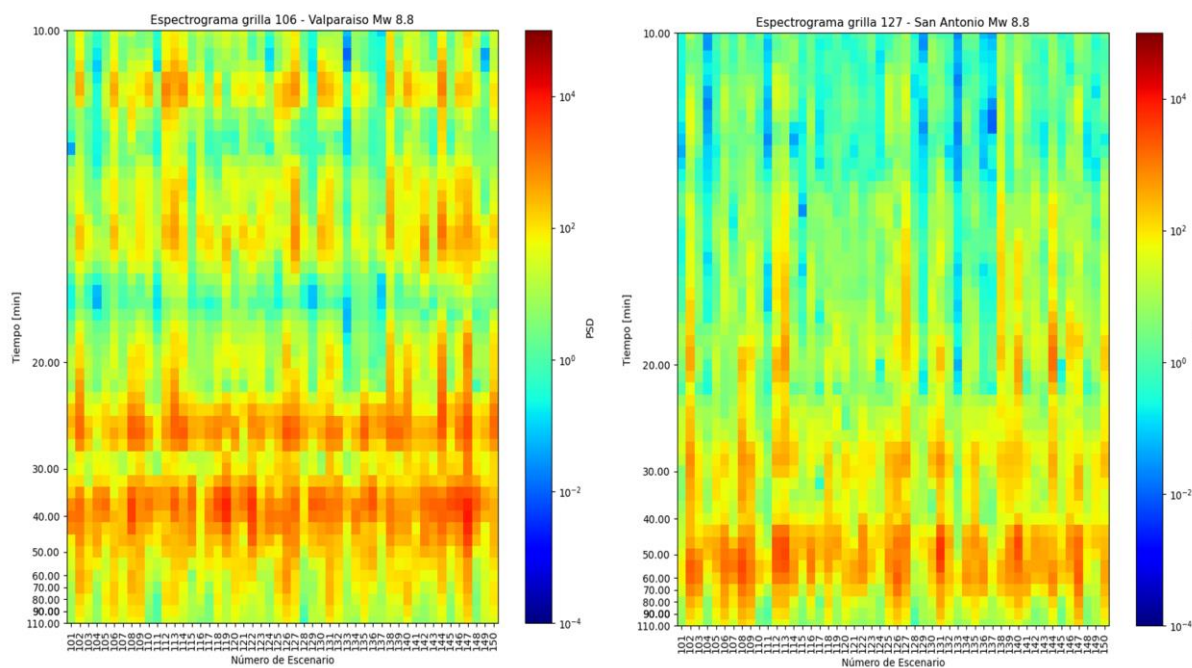


Figura 9-11: Espectrograma de Valparaíso y San Antonio, magnitud Mw 8.8. Fuente: Elaboración propia.

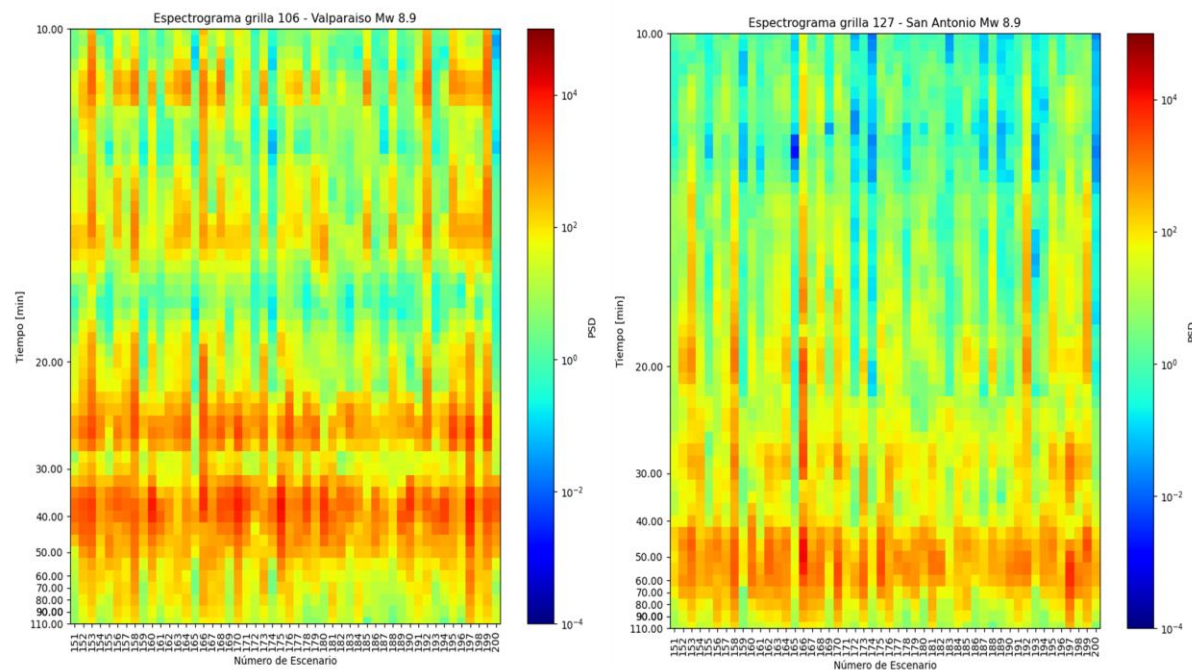


Figura 9-12: Espectrograma de Valparaíso y San Antonio, magnitud Mw 8.9. Fuente: Elaboración propia.

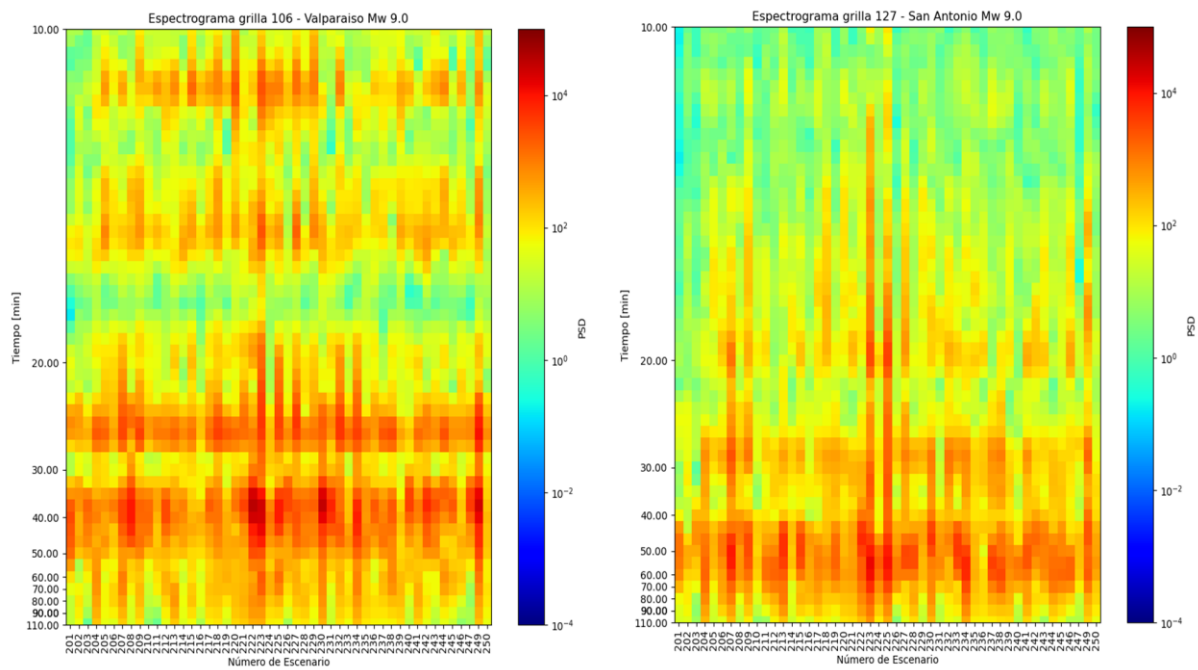


Figura 9-13: Espectrograma de Valparaíso y San Antonio, magnitud Mw 9.0. Fuente: Elaboración propia.

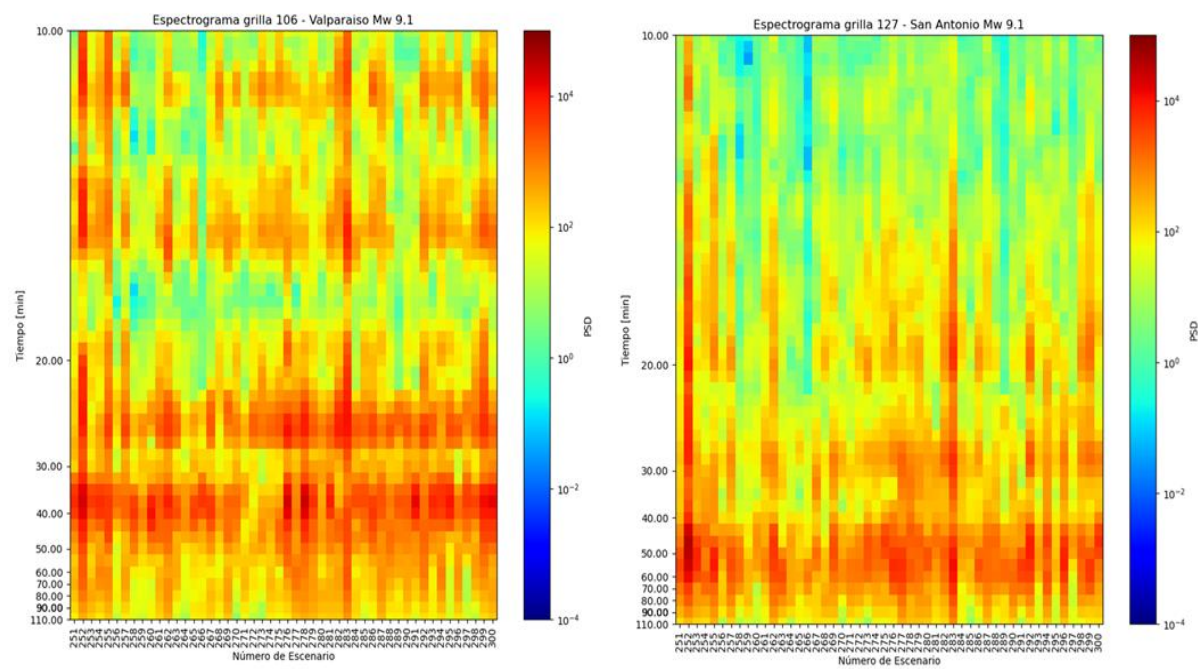


Figura 9-14: Espectrograma de Valparaíso y San Antonio, magnitud Mw 9.1. Fuente: Elaboración propia.

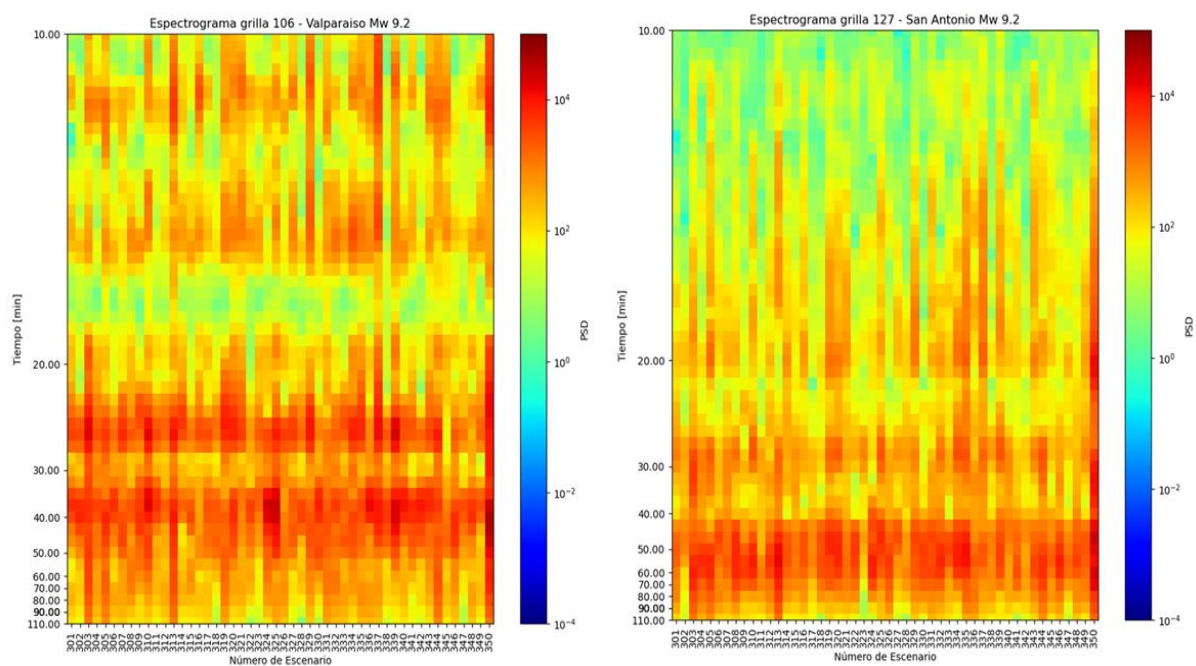


Figura 9-15: Espectrograma de Valparaíso y San Antonio, magnitud Mw 9.2. Fuente: Elaboración propia.

9.3 Influencia de la batimetría

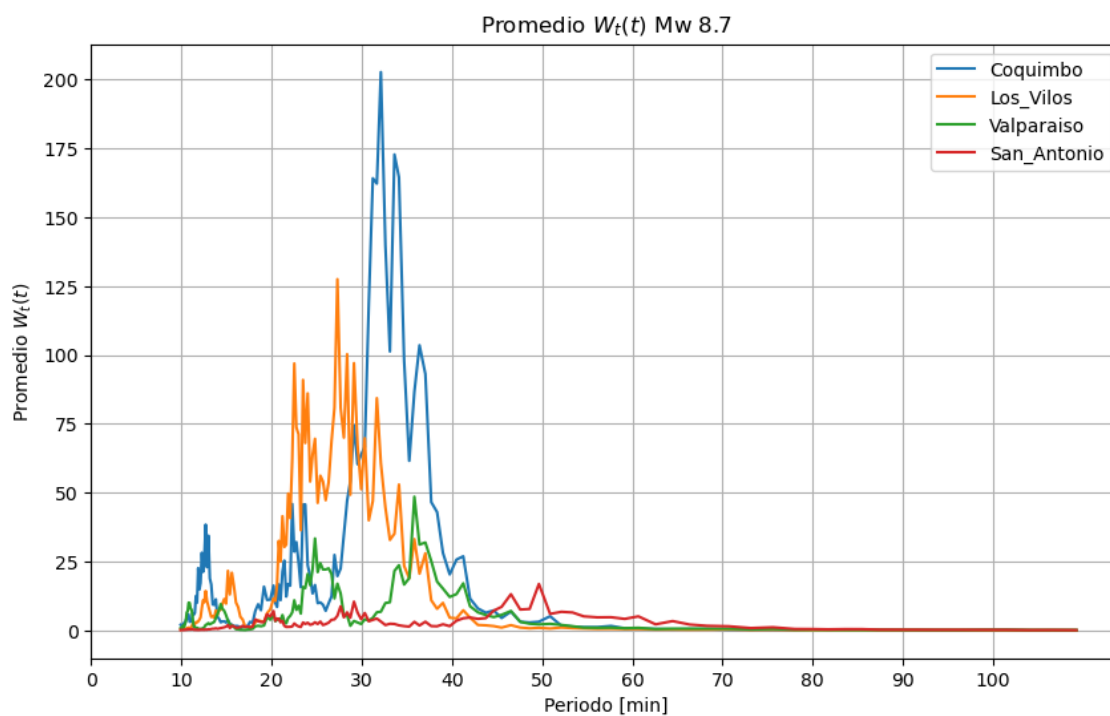


Figura 9-16: $W_t(t)$ promedio. Magnitud Mw 8.7. Fuente: Elaboración propia.

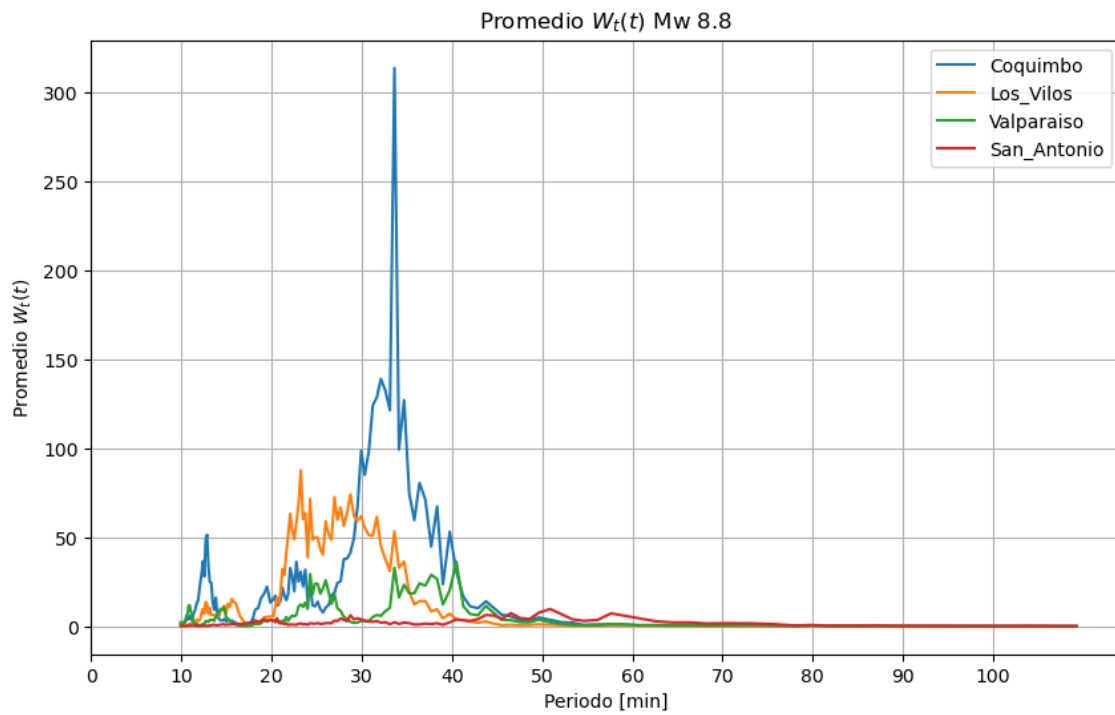


Figura 9-17: $W_t(t)$ promedio. Magnitud Mw 8.8. Fuente: Elaboración propia.

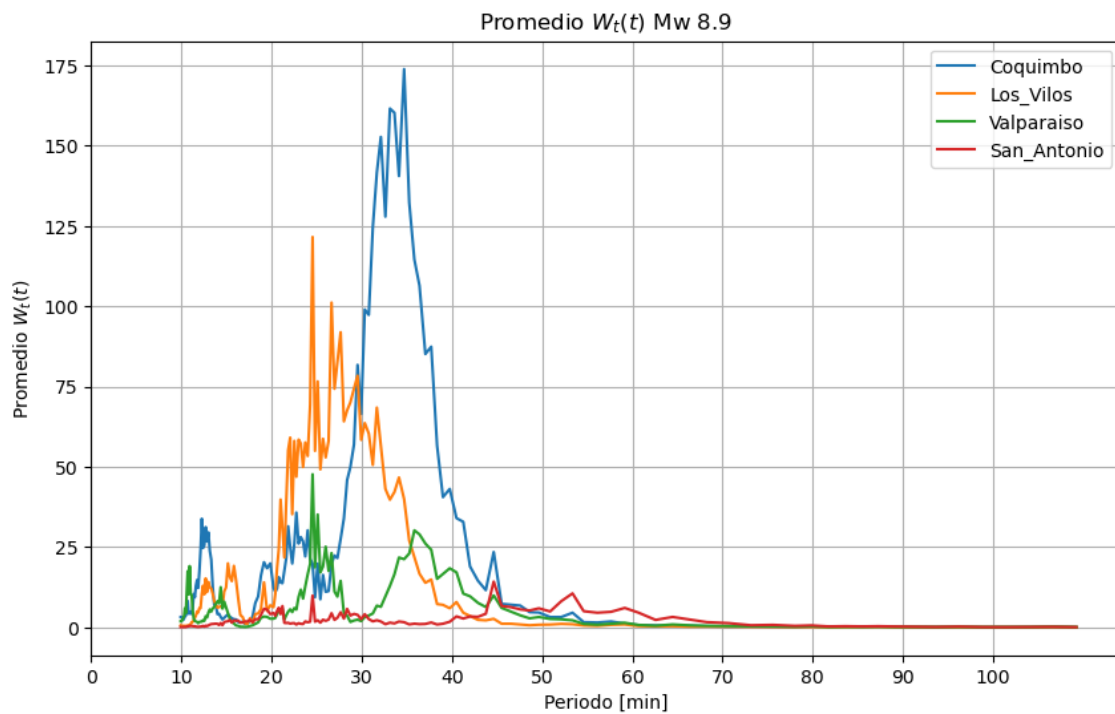


Figura 9-18: $W_t(t)$ promedio. Magnitud Mw 8.9. Fuente: Elaboración propia.

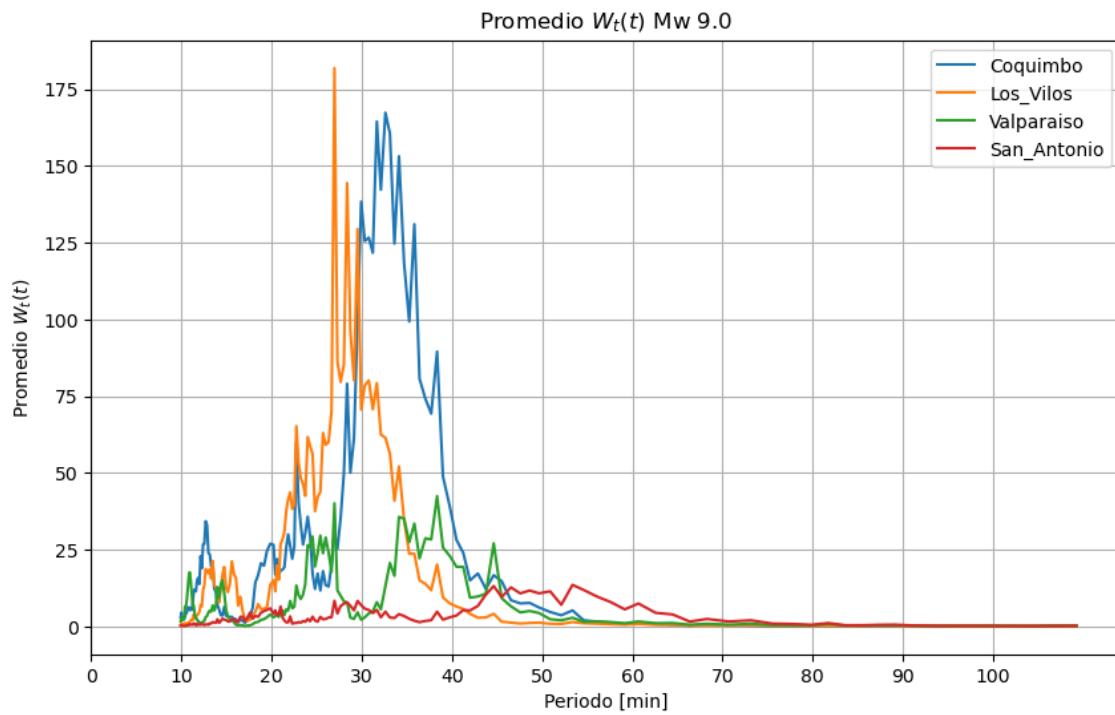


Figura 9-19: $W_t(t)$ promedio. Magnitud Mw 9.0. Fuente: Elaboración propia.

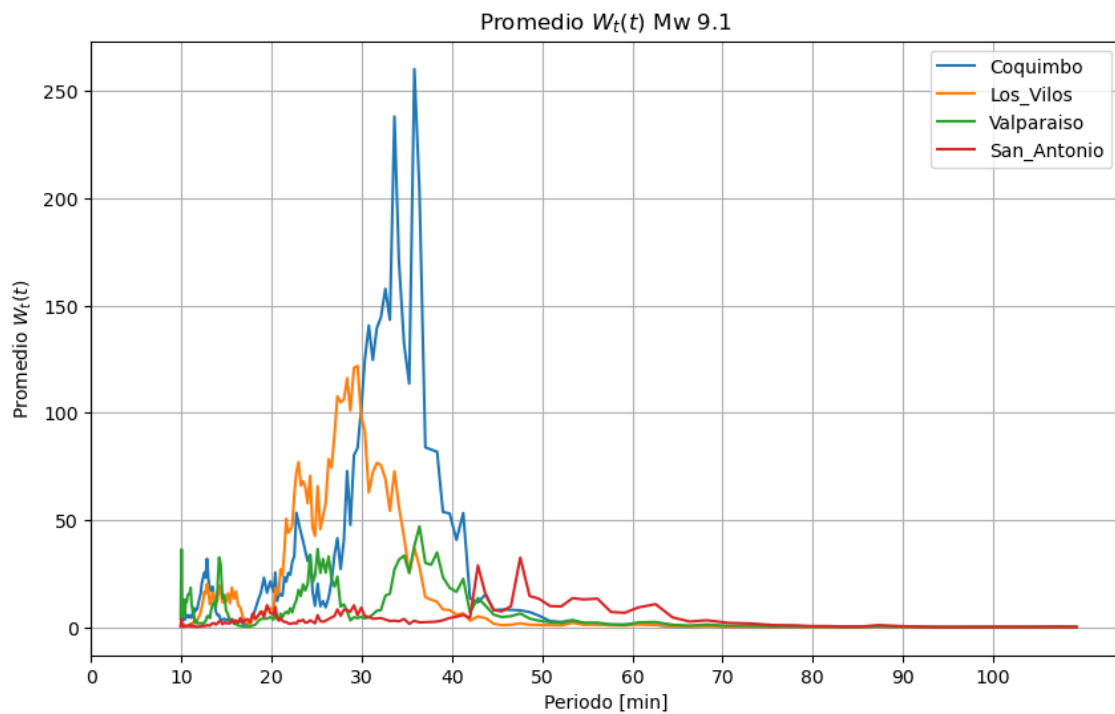


Figura 9-20: $W_t(t)$ promedio. Magnitud Mw 9.1. Fuente: Elaboración propia.

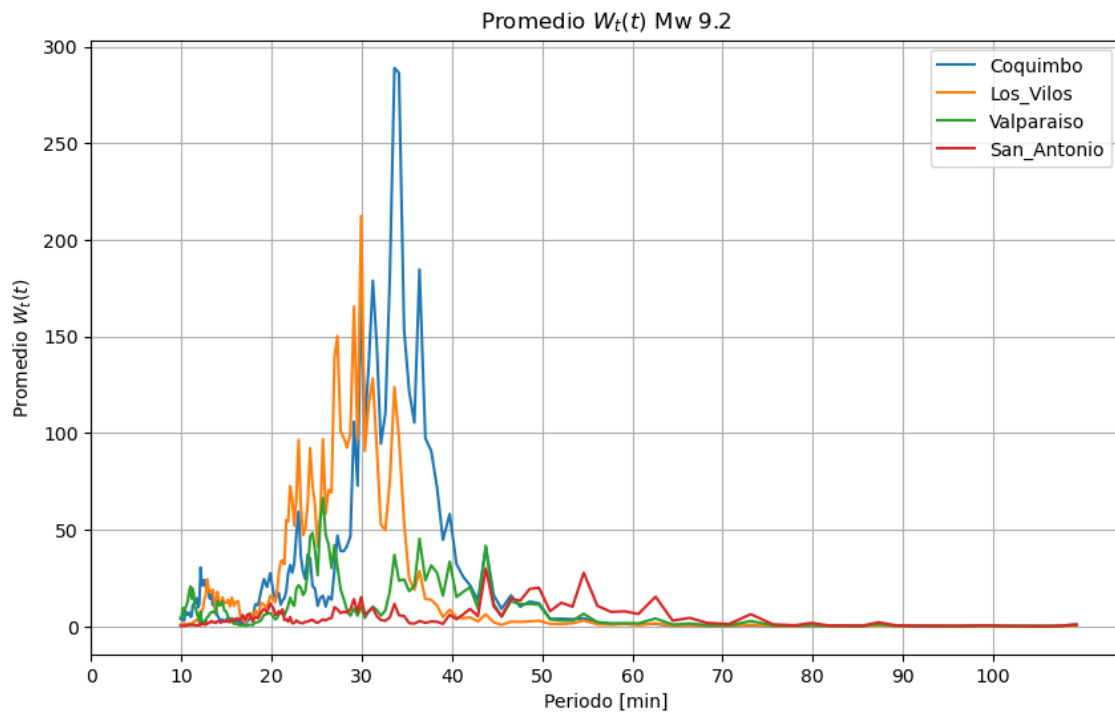


Figura 9-21: $W_t(t)$ promedio. Magnitud Mw 9.2. Fuente: Elaboración propia.

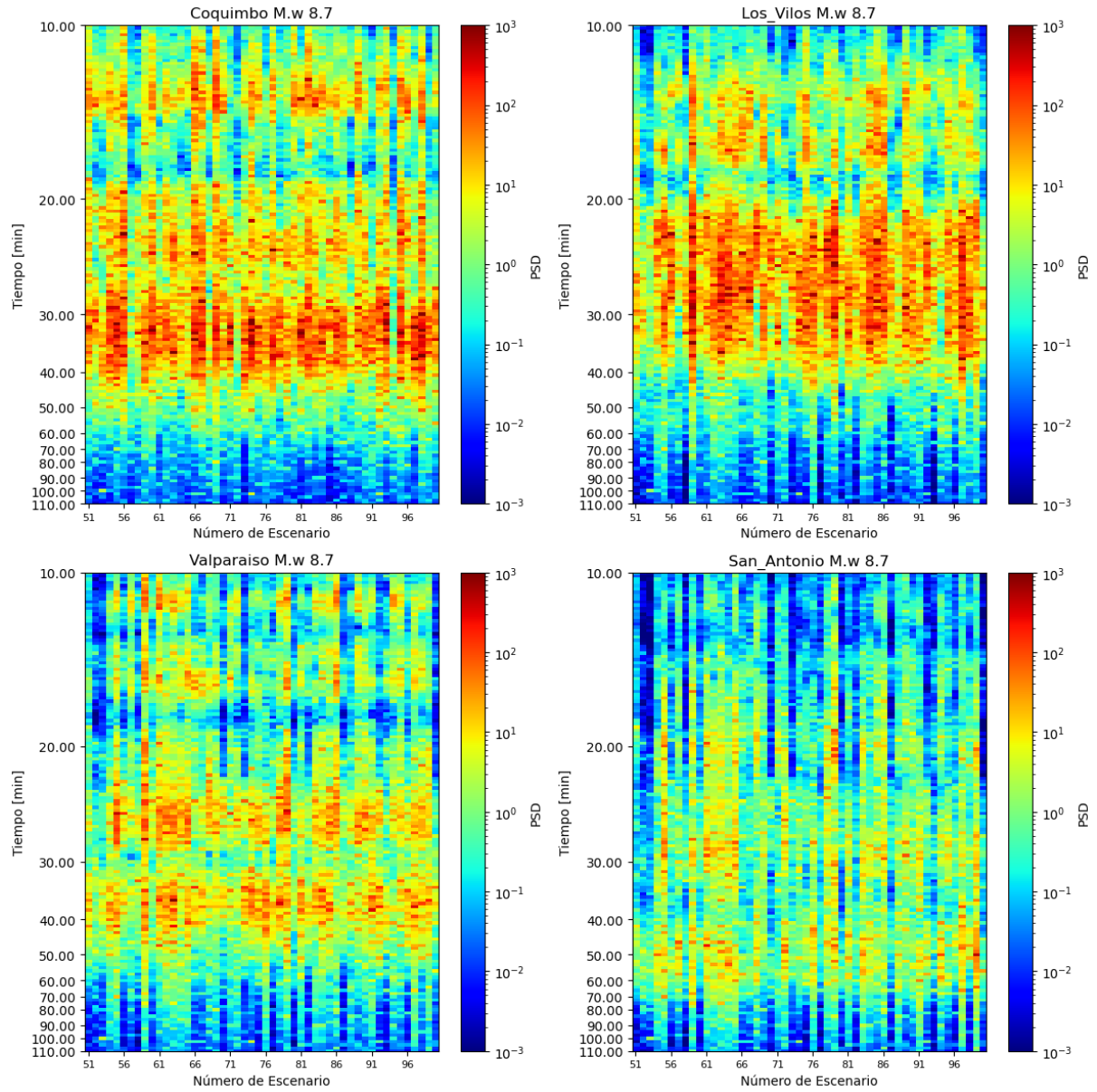


Figura 9-2211:Espectrogramas de $W_t(t)$ para las bahías de Coquimbo, Los Vilos, Valparaíso y San Antonio.
Magnitud Mw 8.7. Fuente: Elaboración propia

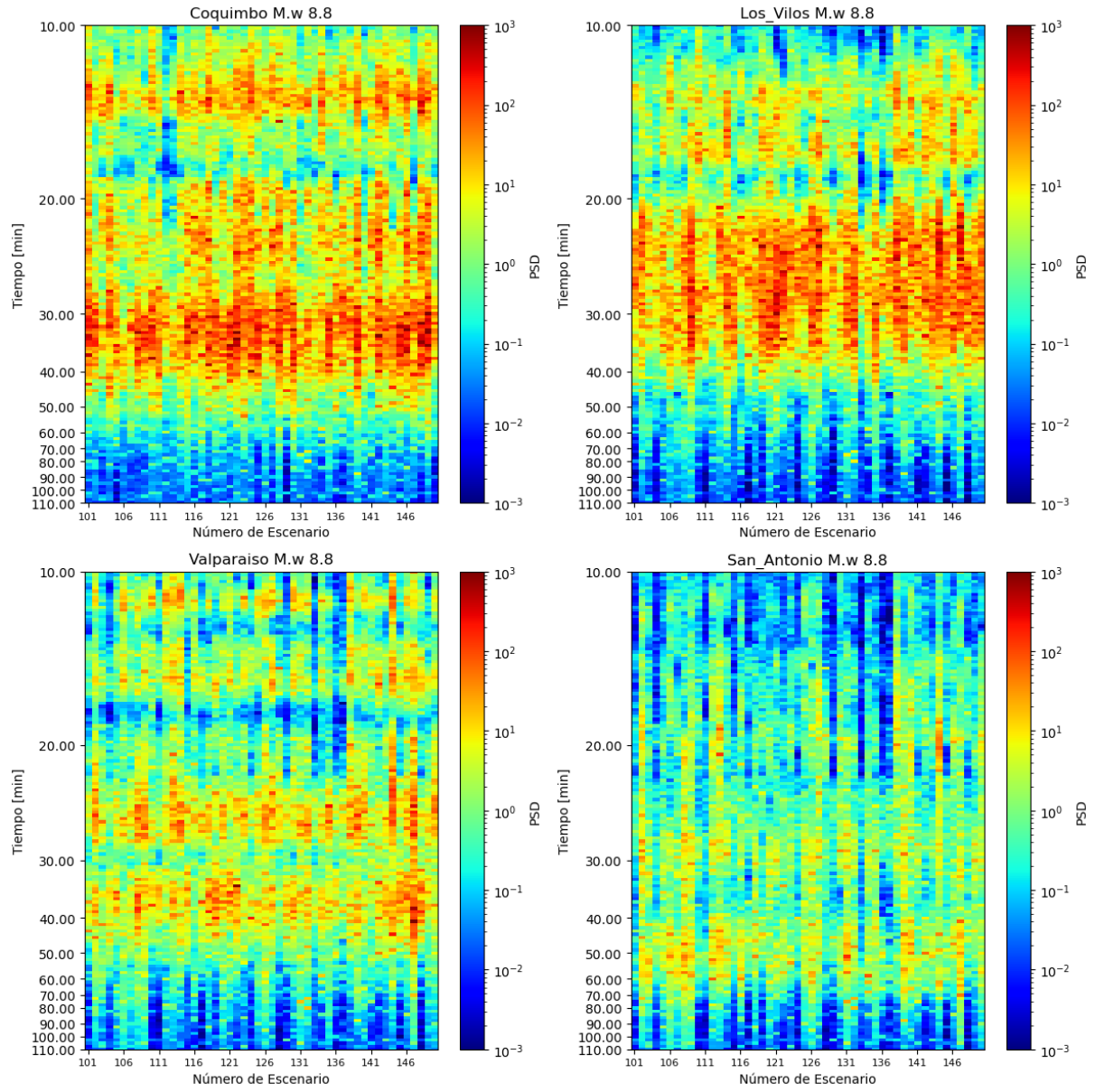


Figura 9-23: Espectrogramas de $W_t(t)$ para las bahías de Coquimbo, Los Vilos, Valparaíso y San Antonio. Magnitud Mw 8.8. Fuente: Elaboración propia

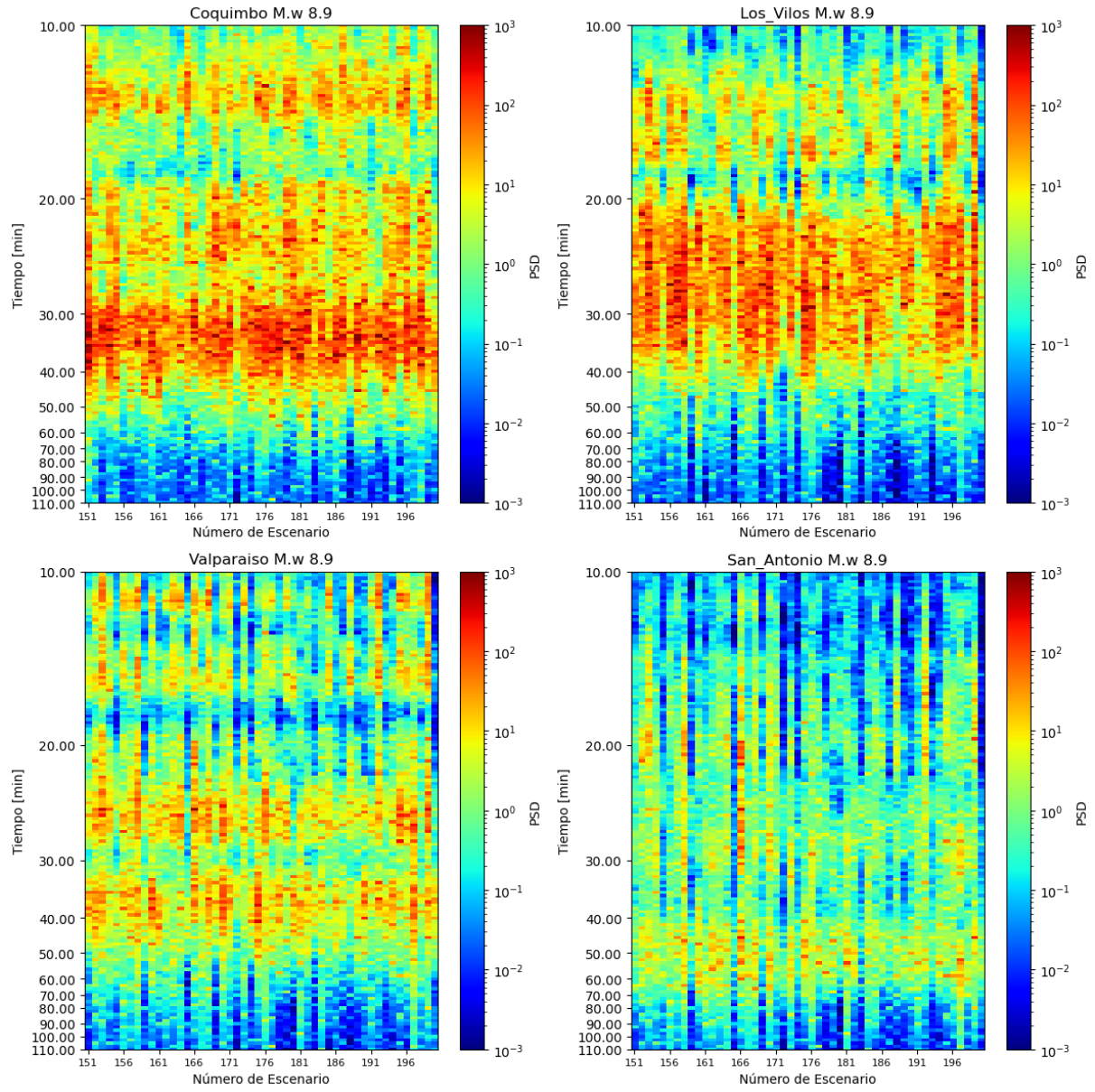


Figura 9-24: Espectrogramas de $W_t(t)$ para las bahías de Coquimbo, Los Vilos, Valparaíso y San Antonio. Magnitud Mw 8.9. Fuente: Elaboración propia

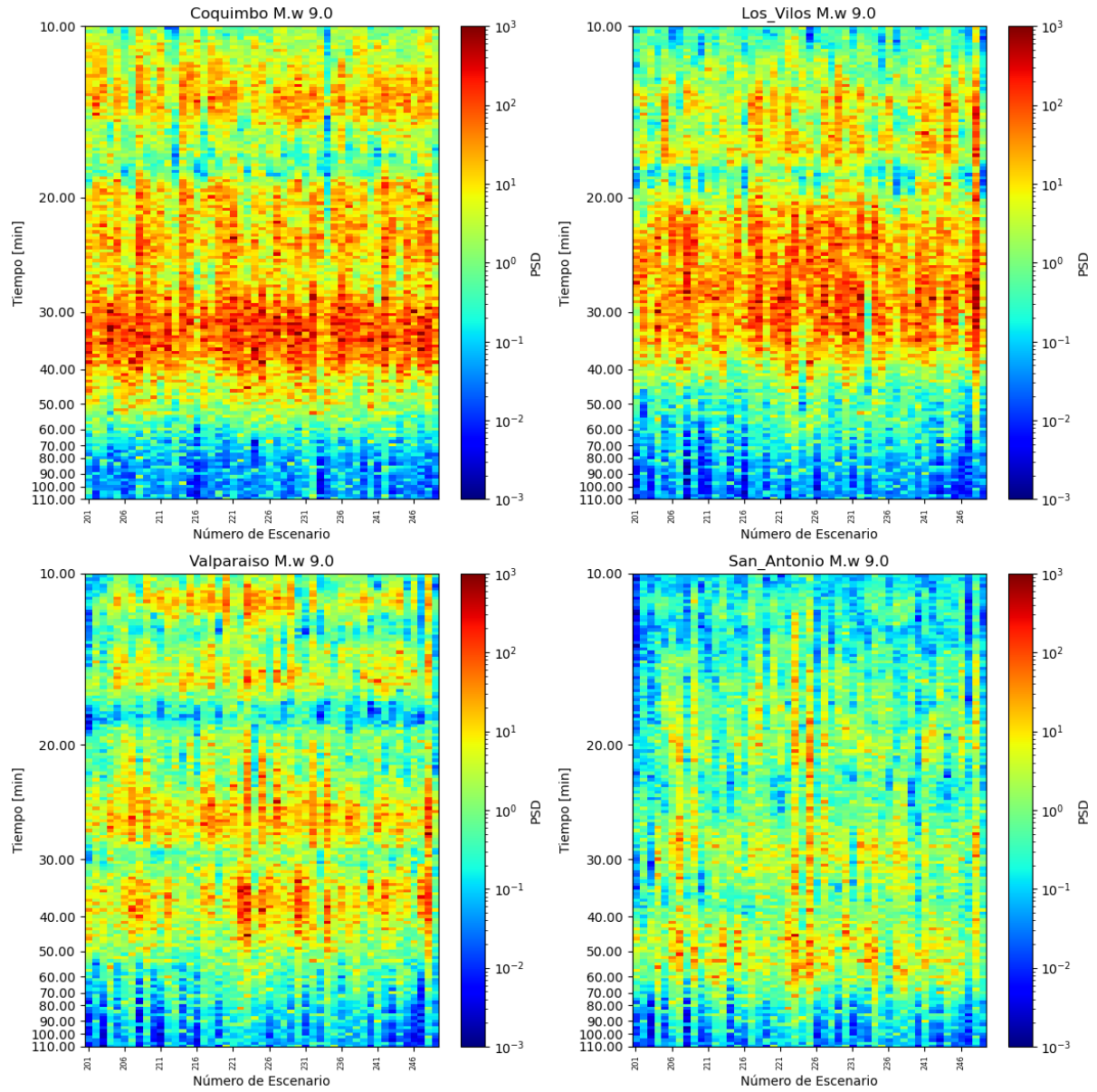


Figura 9-25: Espectrogramas de $W_t(t)$ para las bahías de Coquimbo, Los Vilos, Valparaíso y San Antonio. Magnitud Mw 9.0. Fuente: Elaboración propia

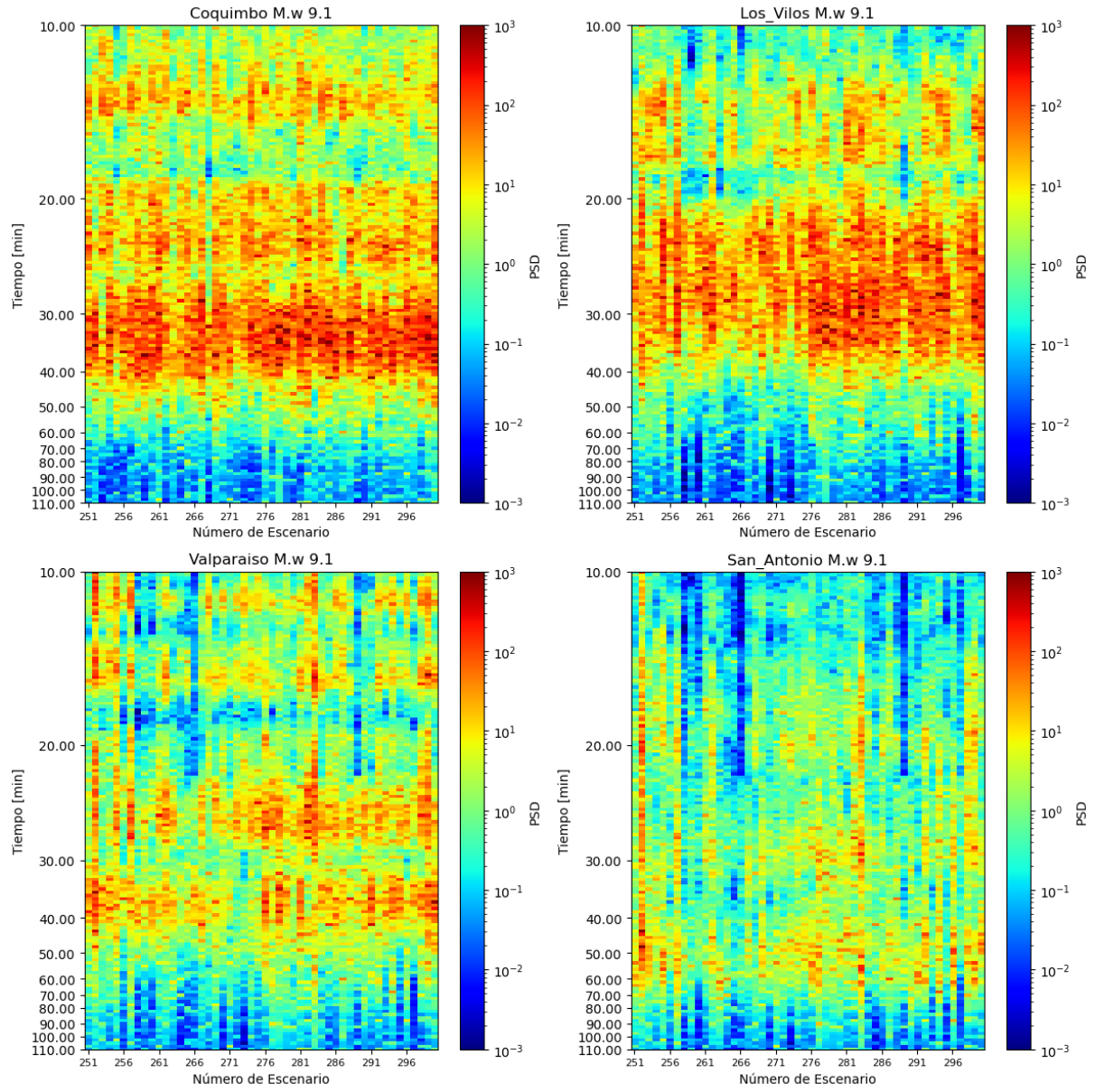


Figura 9-26: Espectrogramas de $W_t(t)$ para las bahías de Coquimbo, Los Vilos, Valparaíso y San Antonio.
Magnitud Mw 9.1. Fuente: Elaboración propia

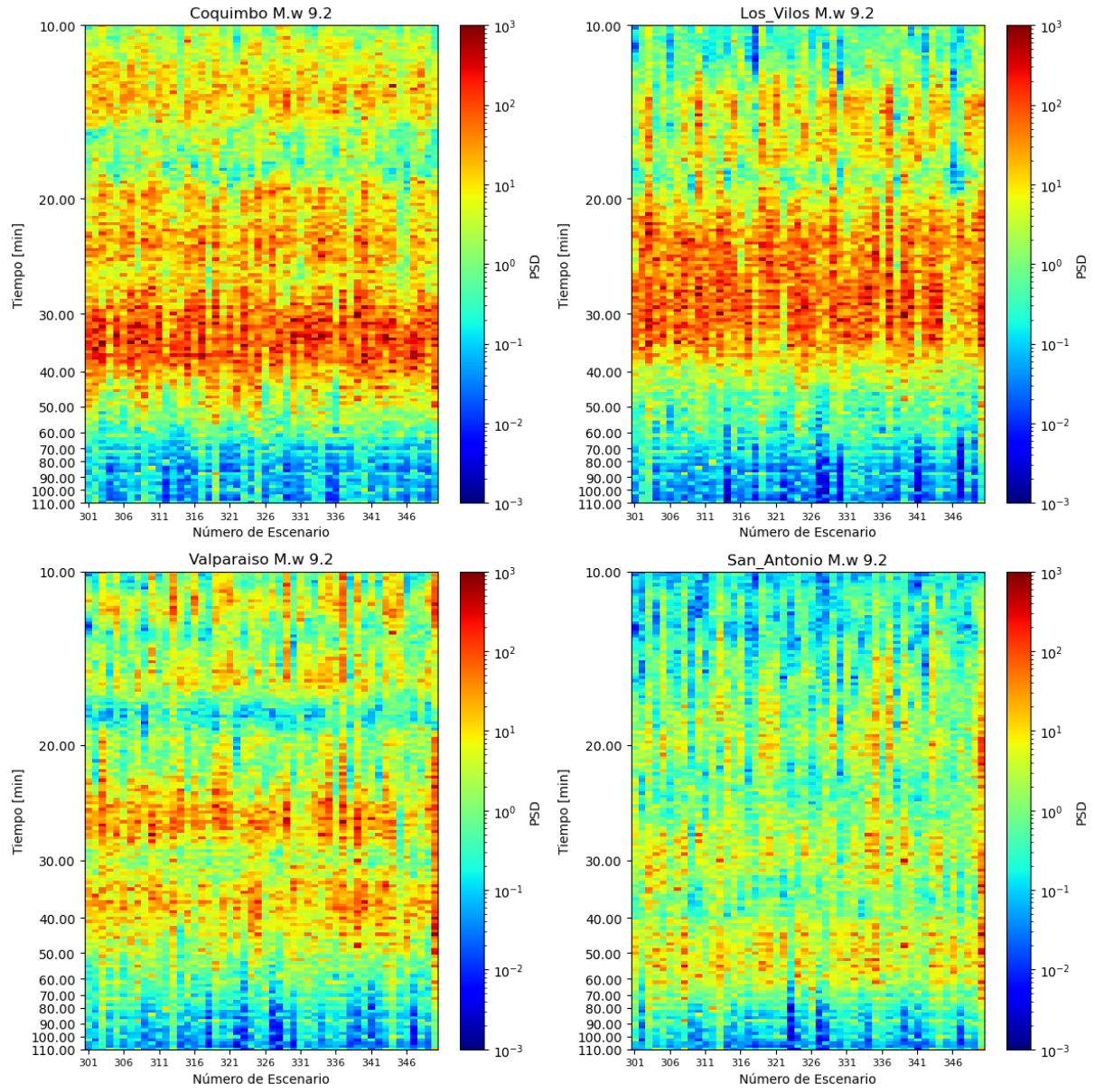


Figura 9-27: Espectrogramas de $W_t(t)$ para las bahías de Coquimbo, Los Vilos, Valparaíso y San Antonio.

Magnitud Mw 9.2 Fuente: Elaboración propia

9.4 Análisis de la fuente Tsunamigénica.

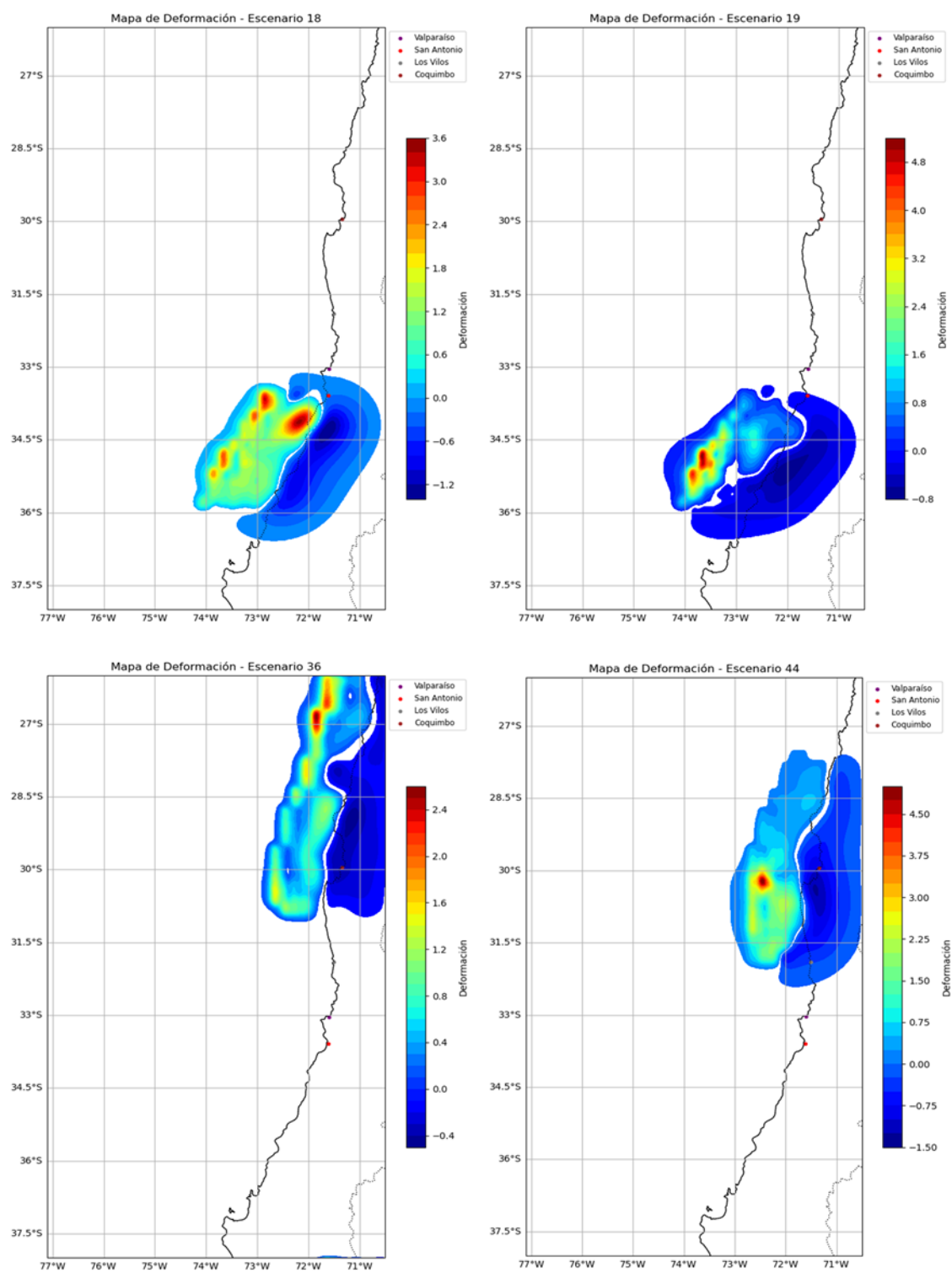


Figura 9-28: Escenarios más energéticos del análisis de la fuente. Magnitud Mw 8.6. Fuente: Elaboración propia.

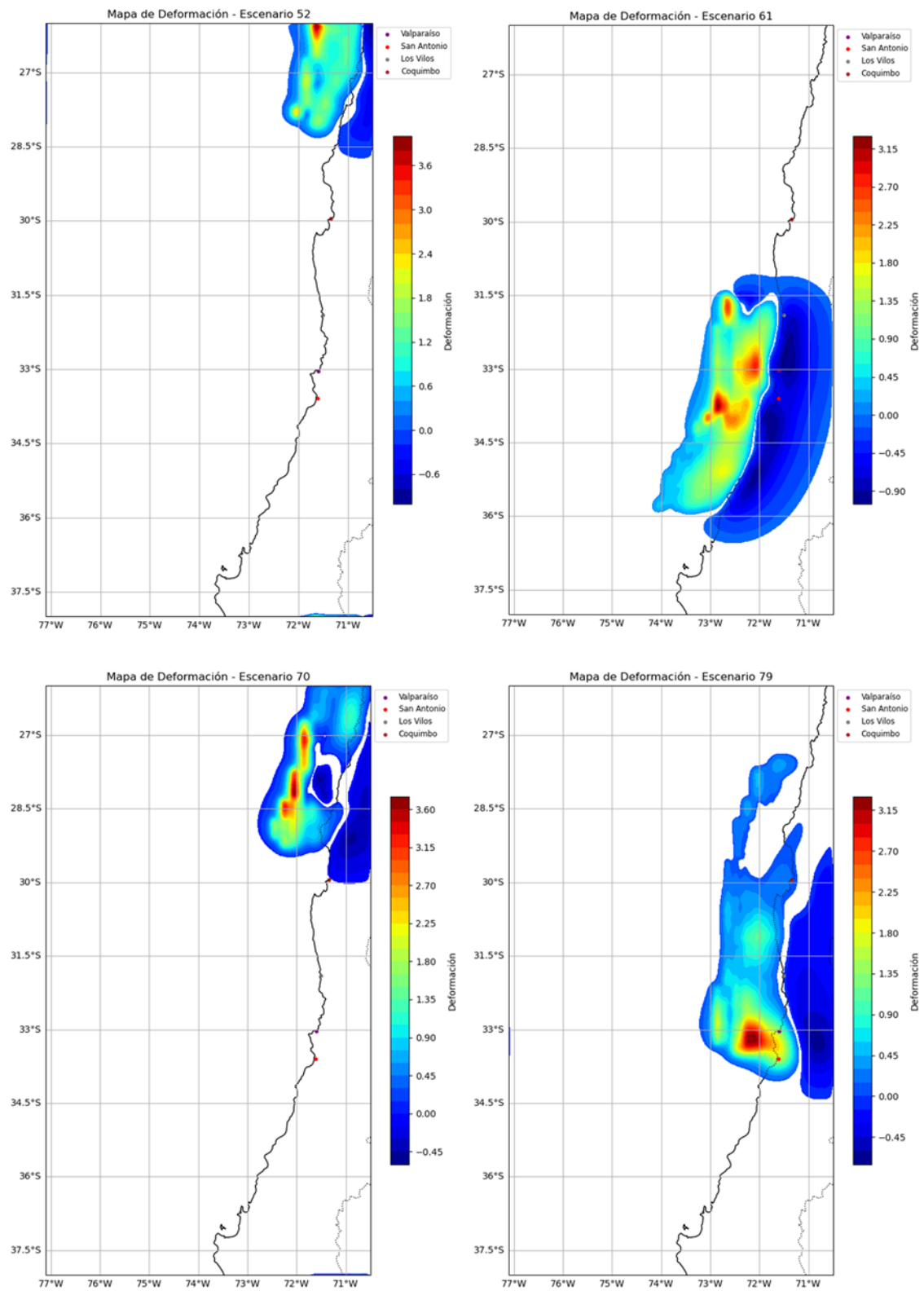


Figura 9-29: Escenarios más energéticos del análisis de la fuente. Magnitud Mw 8.7. Fuente: Elaboración propia.

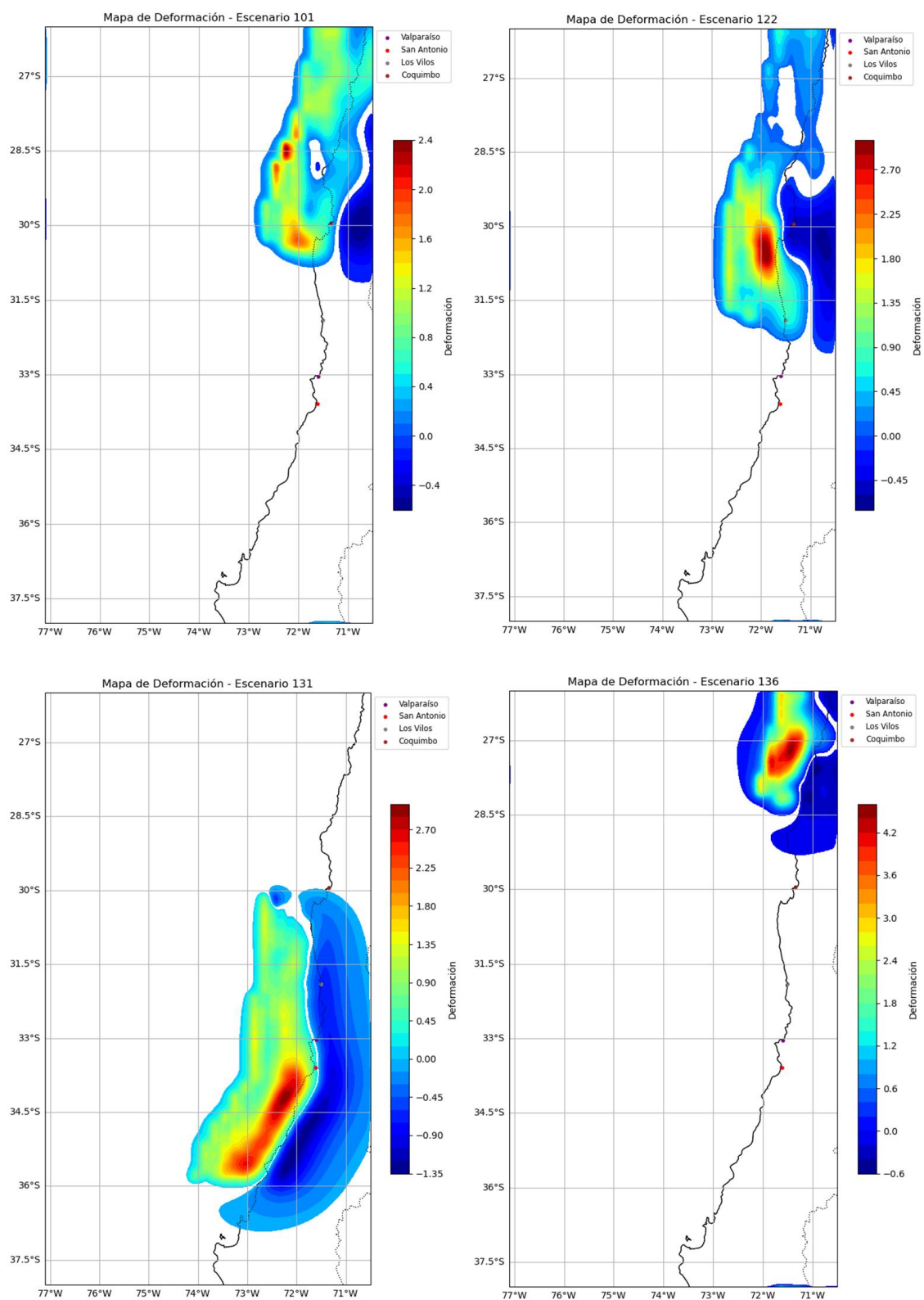


Figura 9-30: Escenarios más energéticos del análisis de la fuente. Magnitud Mw 8.8. Fuente: Elaboración propia.

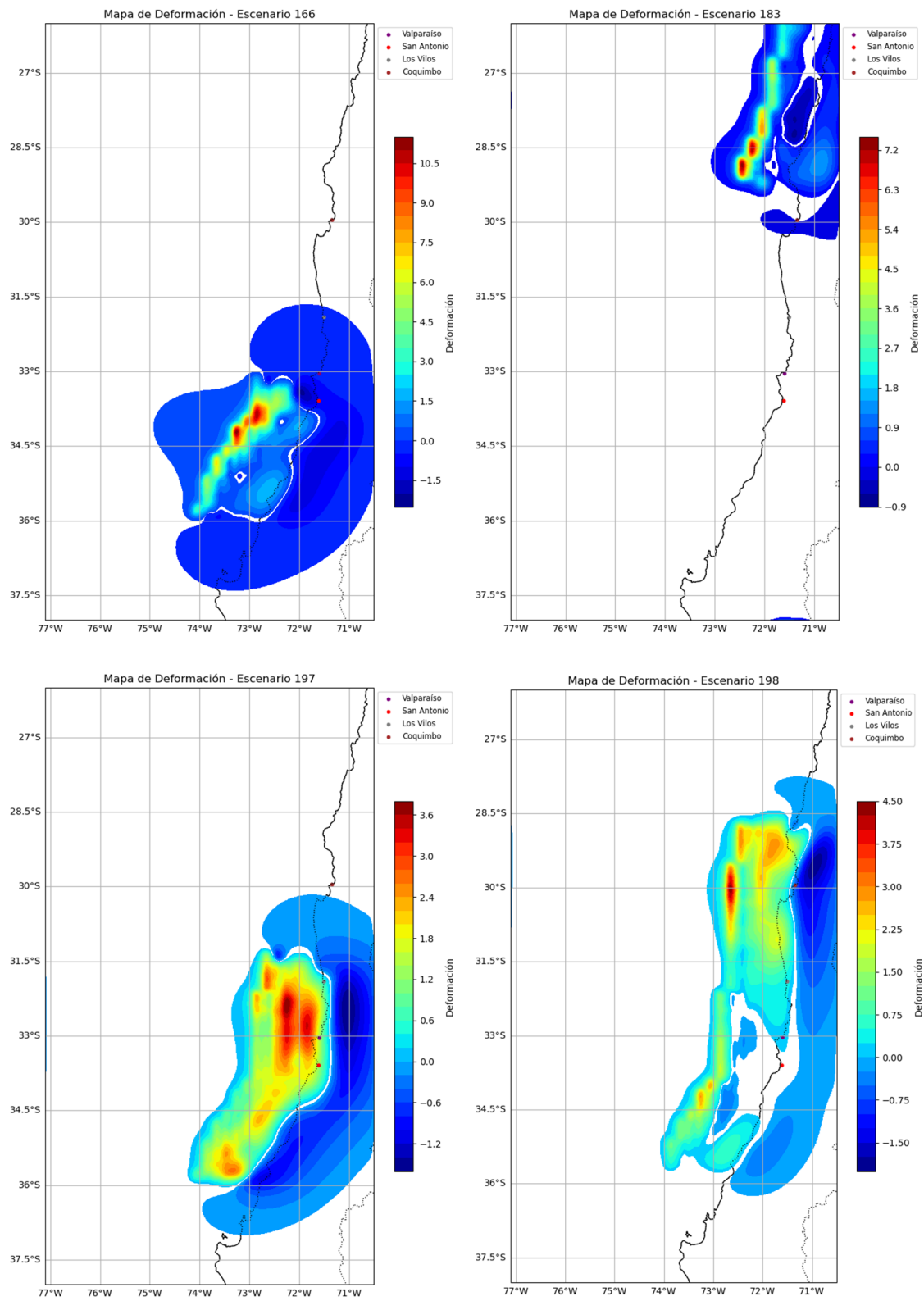


Figura 9-31: Escenarios más energéticos del análisis de la fuente. Magnitud Mw 8.9. Fuente: Elaboración propia.

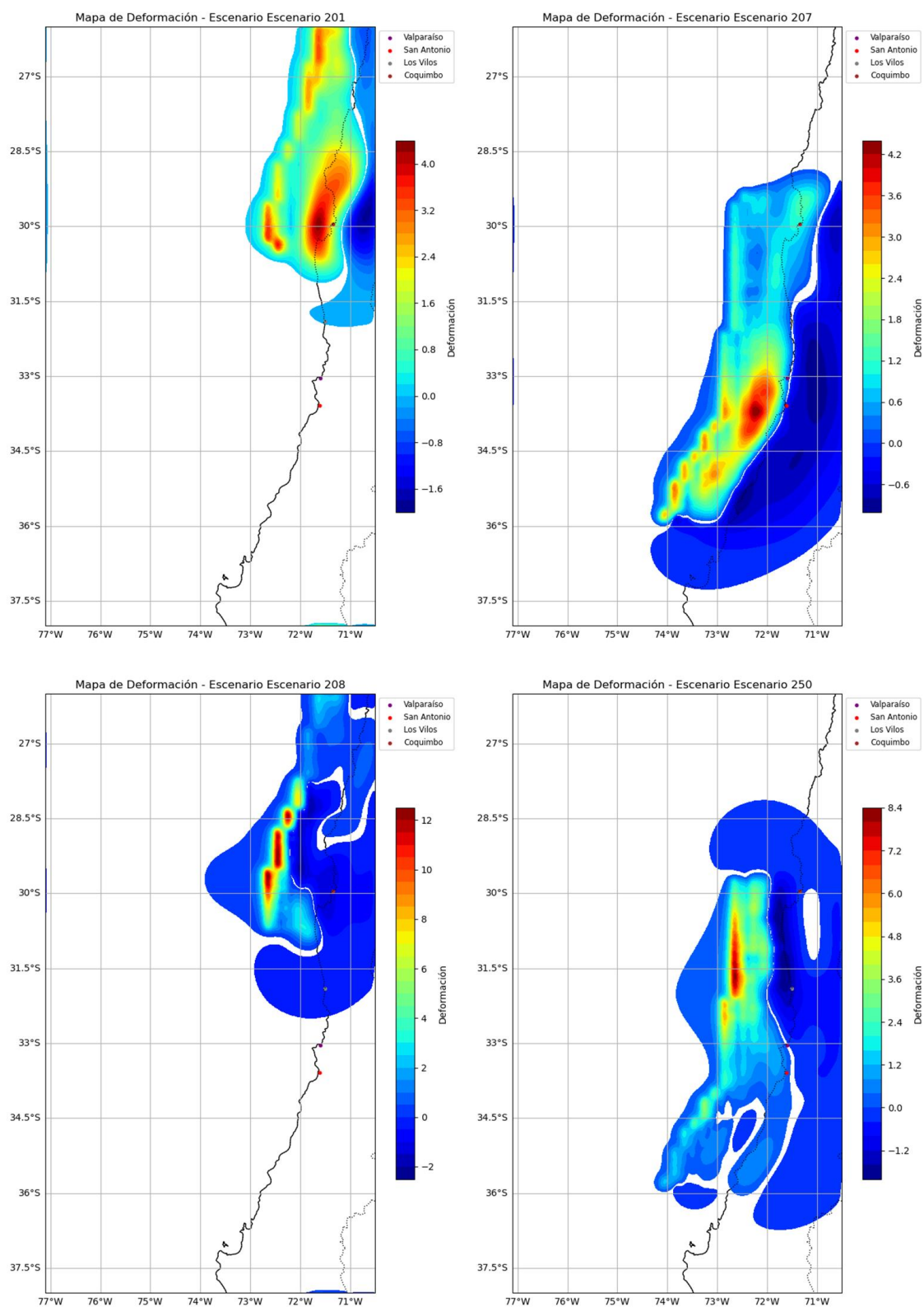


Figura 9-32: Escenarios más energéticos del análisis de la fuente. Magnitud Mw 9.0. Fuente: Elaboración propia.

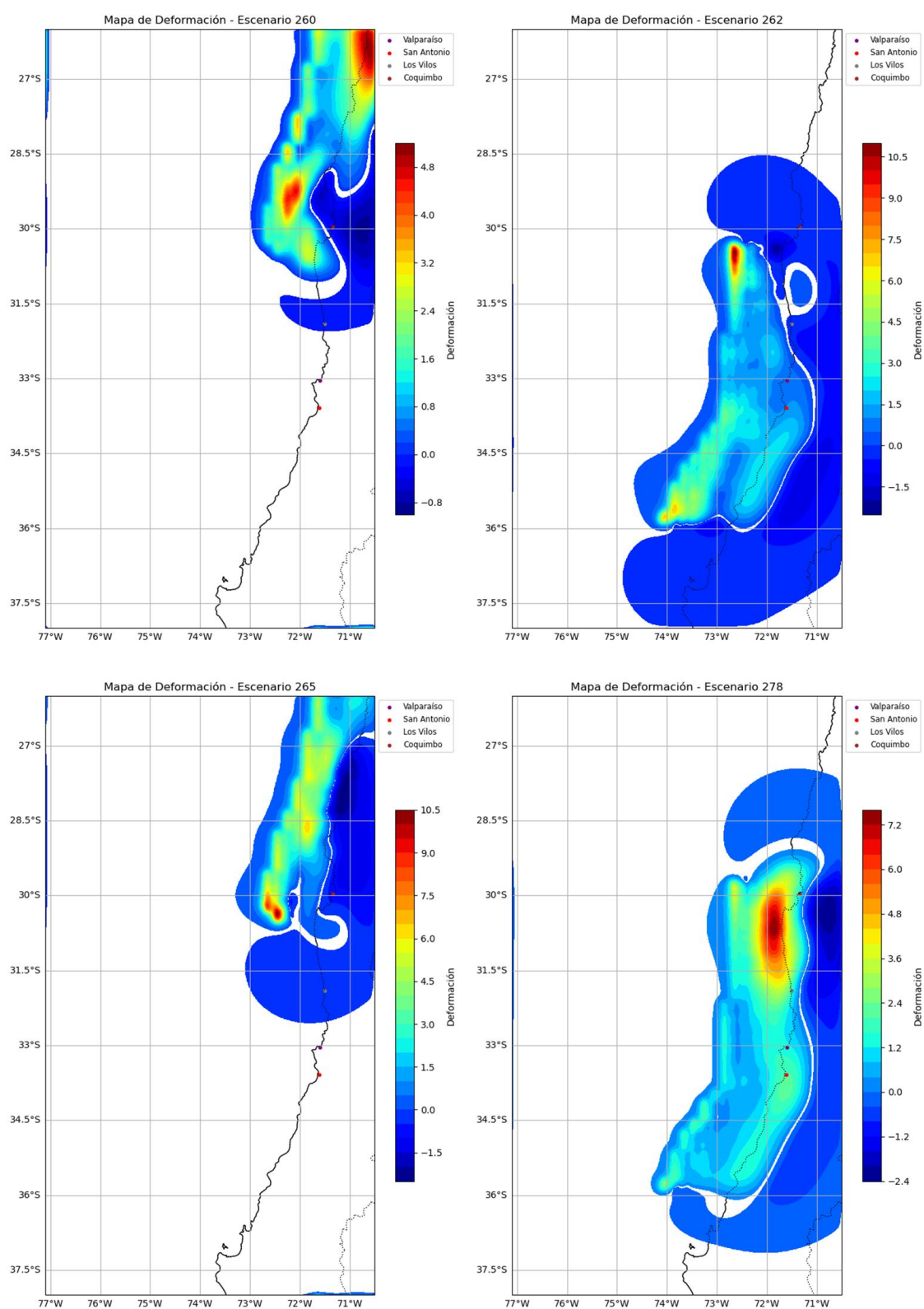


Figura 9-33: Escenarios más energéticos del análisis de la fuente. Magnitud Mw 9.1. Fuente: Elaboración propia.

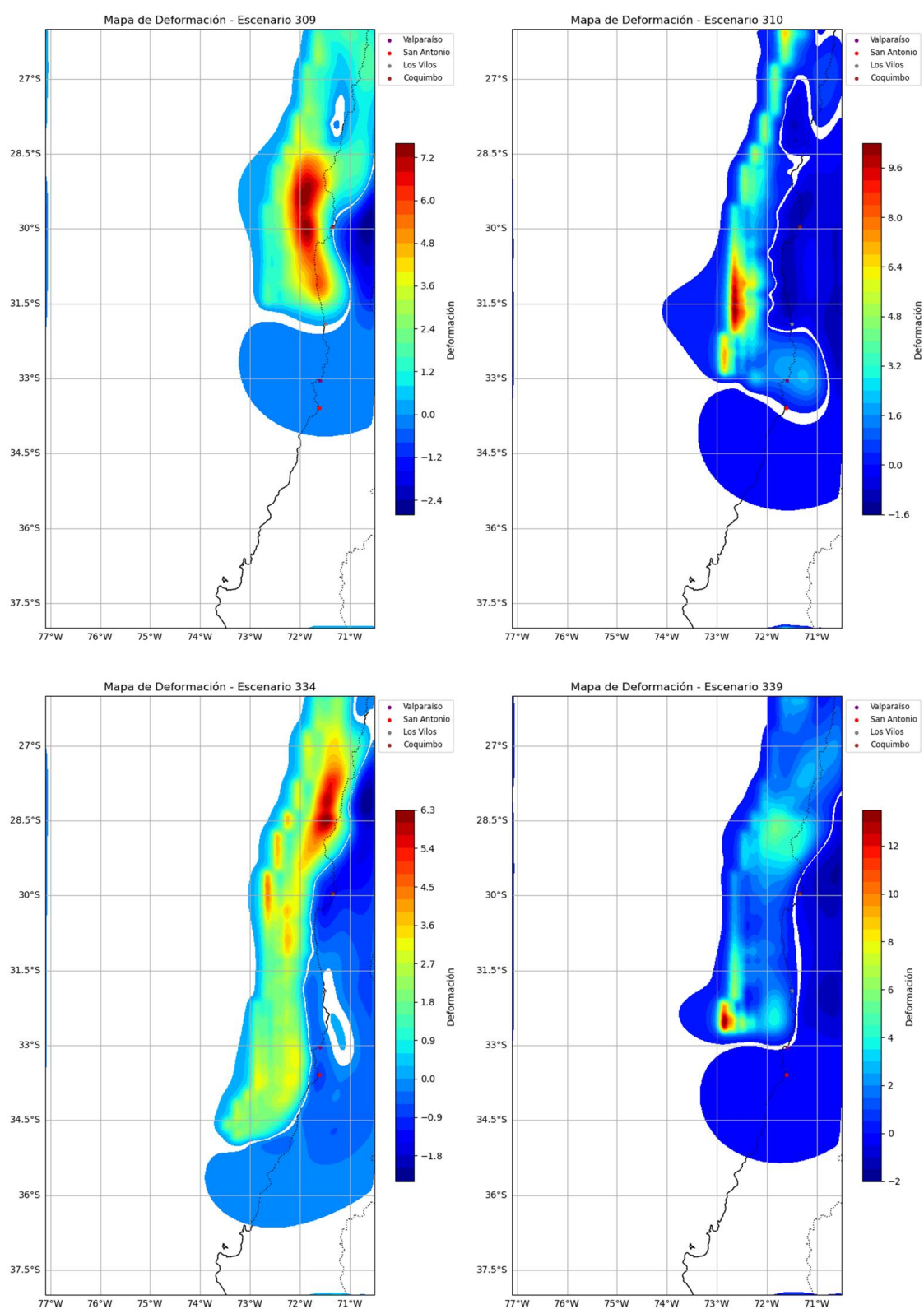


Figura 9-34: Escenarios más energéticos del análisis de la fuente. Magnitud Mw 9.2. Fuente: Elaboración propia.

9.5 Análisis bahía de Valparaíso

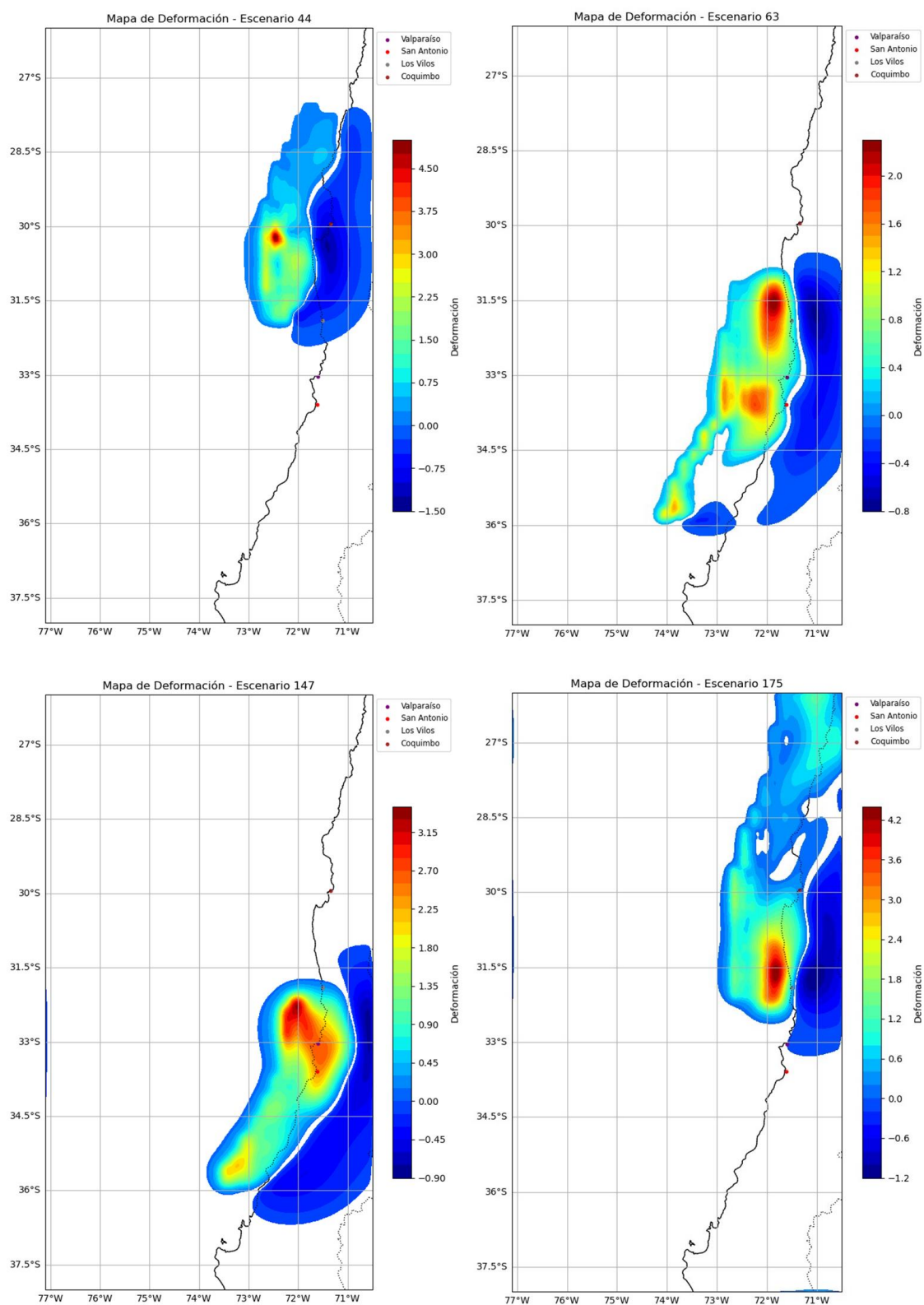


Figura 9-35: Escenarios más energéticos característicos en la bahía de Valparaíso. Fuente: Elaboración propia

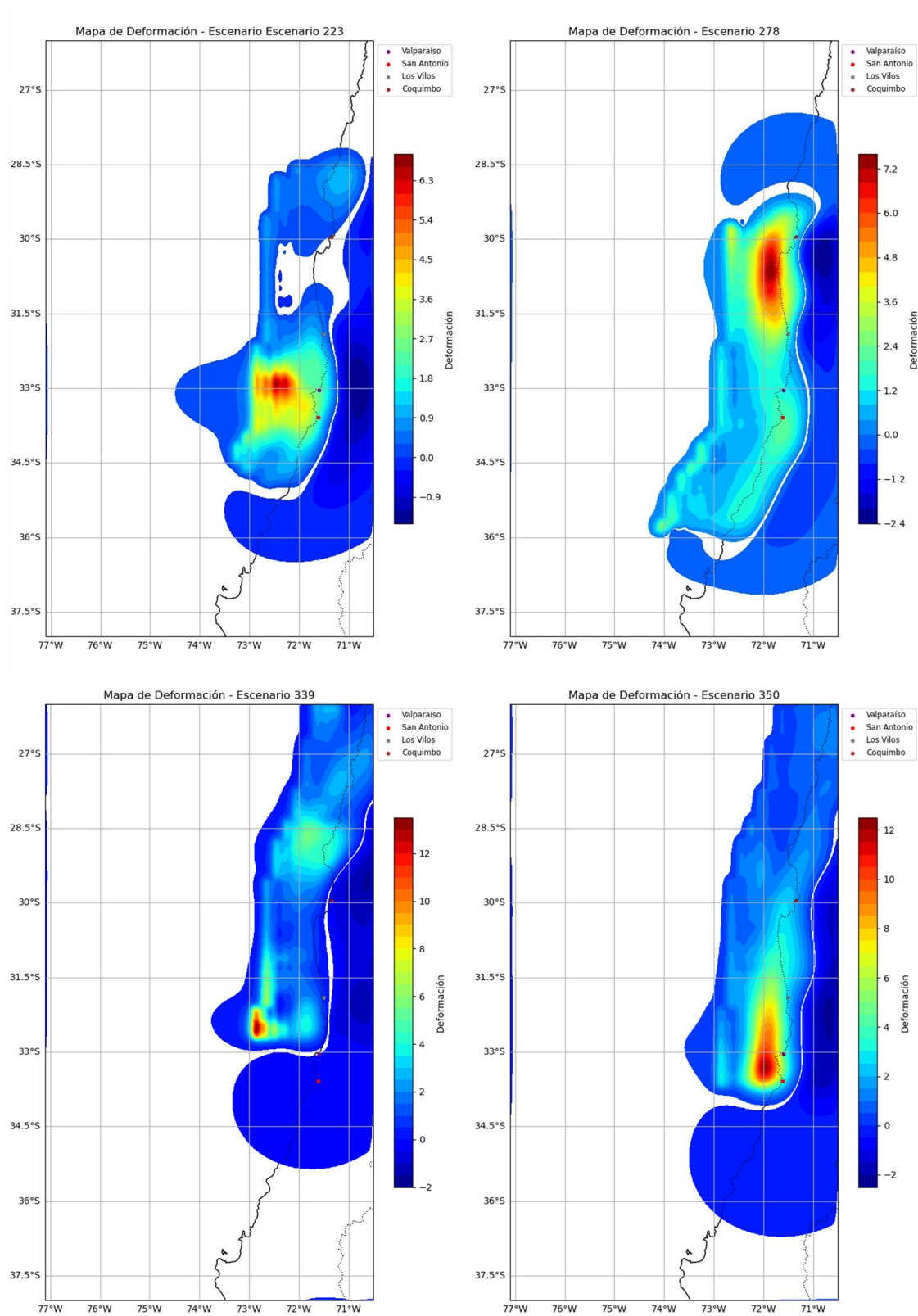


Figura 9-35: (continuación).

9.6 Análisis bahía de San Antonio

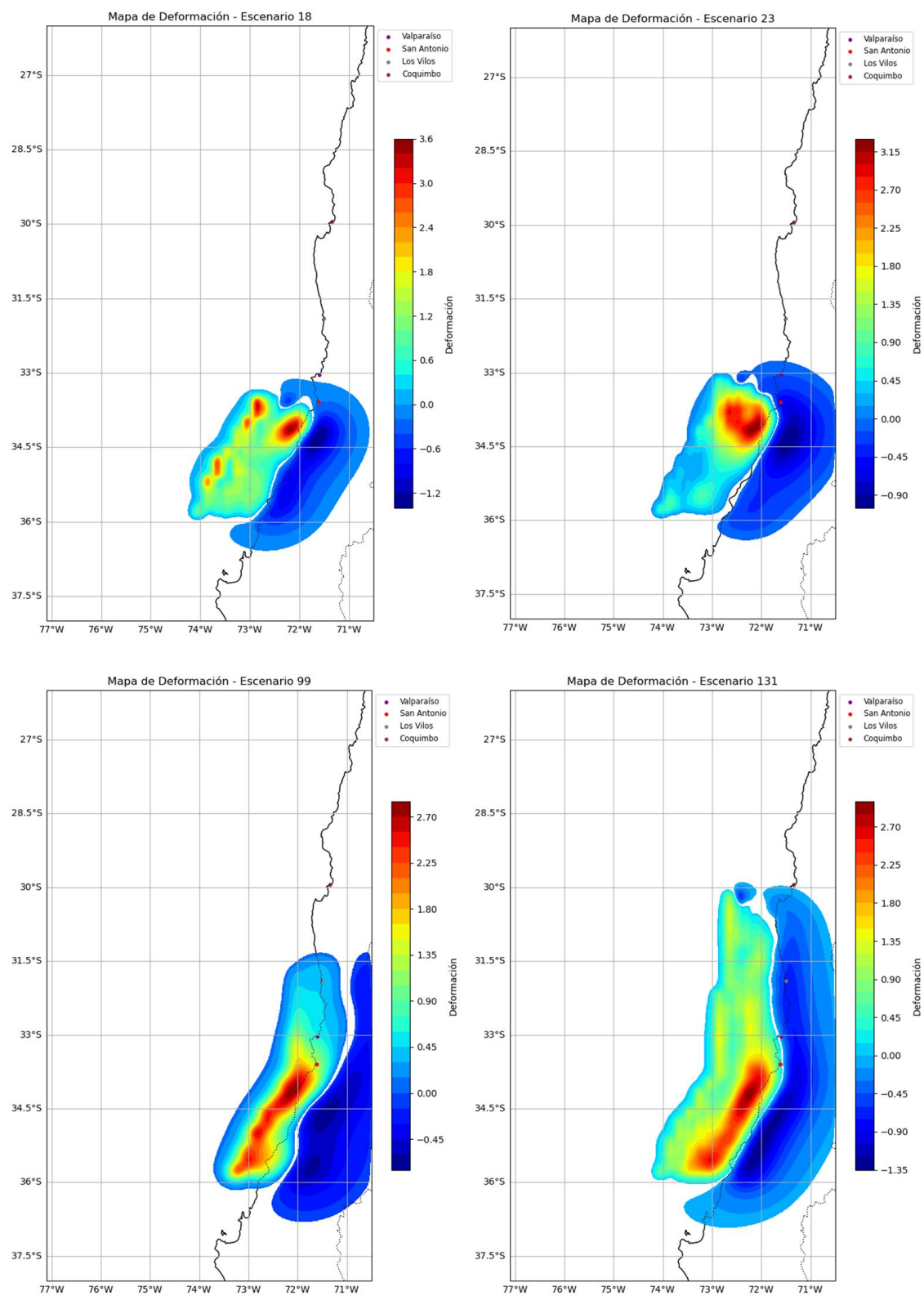


Figura 9-36: Escenarios más energéticos característicos en la bahía de San Antonio. Fuente: Elaboración propia

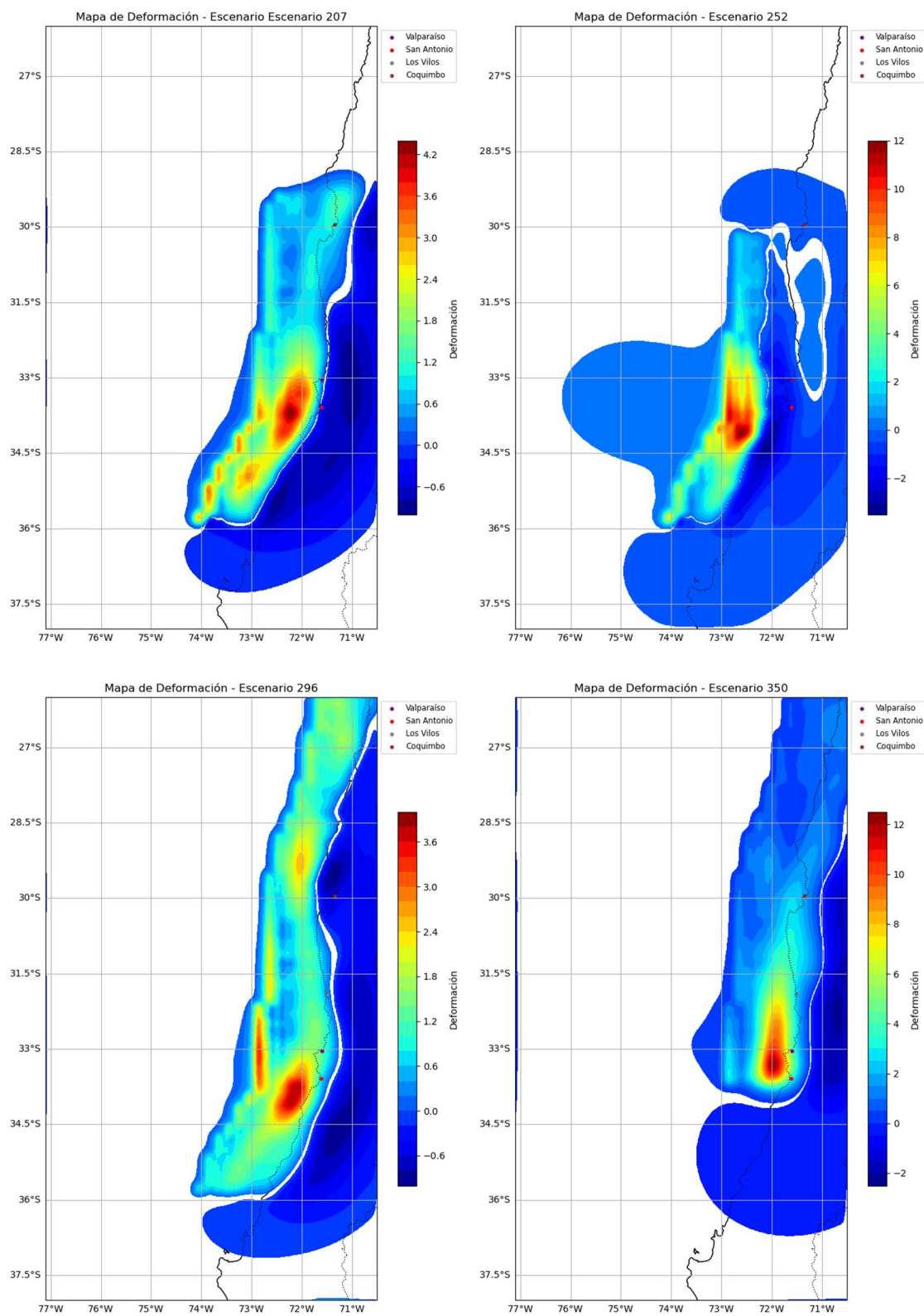


Figura 9-36: (continuación).