



PROGRAMA  
RIESGO SÍSMICO



UNIVERSIDAD  
DE CHILE

# INFORME PROGRAMA RIESGO SÍSMICO 2020

---

Dirección: Blanco Encalada 2002, 5to Piso, Depto Geofísica, FCFM, U. de Chile;  
Tel: +56 2 2696 6563;  
mail: [srojas@dgf.uchile.cl](mailto:srojas@dgf.uchile.cl);  
<http://www.prs.dgf.uchile.cl>

## Índice

INTRODUCCIÓN .....	4
I. LÍNEA DE PELIGRO SÍSMICO .....	7
1. Estudio de amenaza y tomografía sísmica de la zona Norte de Chile ubicada alrededor de la península de Mejillones.....	7
2. Estudio de amenaza y tomografía sísmica de la zona Centro Norte región de Atacama 10	
3. Análisis de espectros de terremotos.....	12
II. LÍNEA TSUNAMI.....	14
1. Modelamiento analítico y numérico .....	15
2. Alerta temprana .....	23
3. Peligro Tsunamigénico .....	25
4. Caracterización de la fuente tsunamigénica .....	26
5. Observaciones y futuros avances.....	29
III. SISTEMAS COMPLEJOS PARA ESTIMAR PELIGRO SÍSMICO .....	30
1. Estimación del peligro sísmico en Chile: .....	30
2. Desarrollo de una herramienta pronosticadora de aumento de sismicidad .....	30
3. Modelamiento matemático de catálogos sísmicos.....	31
4. Formación en metodología del estado del arte en estimación del riesgo sísmico .....	31
5. Difusión.....	31
Observaciones y futuros avances.....	31
IV. ANÁLISIS DE TERREMOTOS CON SEÑALES SATELITALES, MAREÓGRAFOS Y SISMÓMETROS .....	34
1. Localización .....	35
2. Mecanismo focal .....	35
3. Modelización de la fuente sísmica .....	36
4. Observaciones y futuros avances:.....	37
V. LÍNEA ESTUDIOS DE SISMICIDAD .....	41
GNSS EN TIEMPO REAL.....	41
1. Antecedentes .....	41

2.	Tareas realizadas .....	42
3.	Estado de avance.....	42
4.	Observaciones y futuros avances.....	43
ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA CORTICAL CHILE CENTRAL, FRENTE CORDILLERANO.....		47
1.	Antecedentes .....	47
2.	Metodología .....	50
3.	Resultados .....	52
VI. LÍNEA INVESTIGACIÓN PATRIMONIO.....		63
1.	Tareas realizadas .....	63
2.	Estado de avance (%) .....	64
3.	Observaciones y futuros avances.....	64
5.	Publicaciones del período .....	66
VII. LÍNEA FORMACIÓN .....		68
1.	Diploma Gestión, Ingeniería y Ciencias para la Resiliencia a los Desastres .....	70
VIII. LÍNEA EXTENSIÓN Y DIFUSIÓN EDUCATIVA.....		71
1.	Proyecto Asociativo Regional Explora 2019-2022.....	73
2.	Diseño y Comunicación Visual.....	76



## INTRODUCCIÓN

El presente Informe entrega los principales avances y resultados alcanzados durante el año 2020, en las distintas líneas y proyectos del Programa Riesgo Sísmico, PRS.

Debemos hacer presente que muchas de las planificaciones originales realizadas a finales de 2019 debieron ajustarse debido a las limitaciones y restricciones de las autoridades para enfrentar la pandemia provocada por el SARS-CoV-2; no obstante, el proceso de migración y reconversión de actividades presenciales en virtuales, más allá del desafío, permitió ampliar la cobertura y recepción de éstas atravesando las fronteras nacionales, permitiendo mostrar el trabajo del PRS a latitudes originalmente impensadas.

De los avances que se presentan, cabe destacar el aporte que el PRS ha venido haciendo en la utilización de nuevas tecnologías para la comprensión de los fenómenos sísmológicos, abriendo caminos de innovación, hasta ahora no explorados. Estos aportes a la innovación en el área de la sismología se han desarrollado en estrecho vínculo con instituciones relacionadas con políticas públicas en reducción de riesgo de desastres, más allá de la Academia, especialmente del ámbito público.

Una línea importante de innovación ha sido el desarrollo de tecnologías geoespaciales integradas a los procesos de análisis de flujos de datos en tiempo real para generar información científica que permita la reducción de incertidumbre en el manejo de contingencias. Es un aporte a la dimensión reactiva que el país requiere mantener actualizada y en constante desarrollo. La incertidumbre está cada vez más presente en el debate público de las geo-amenazas y también en el análisis de los principales elementos de una decisión en momentos de contingencia. Las acciones emprendidas por el PRS, en el periodo que da cuenta este reporte, han incorporado además las tecnologías satelitales para ampliar las posibilidades de identificación y caracterización de terremotos también en la dimensión preventiva. Como resultado de ello se lograron poner en marcha tres nuevas tecnologías satelitales y a comienzos del 2020 algunas de ellas ya comienzan a tener resultados promisorios. Éstas son:

- i) Interferometría de Radar (InSAR), ii)
- ii) procesamiento de datos GPS en tiempo real (cGPS a 1 Hz) en colaboración con la Universidad de Wuhan, China y, iii)
- iii) Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite (DORIS) en colaboración con el CNES y IGN de Francia.

Se fortalecieron los vínculos de colaboración con la Dirección Meteorológica de Chile en la formación de capacidades y competencias en tecnologías satelitales de observación de la Tierra a través de la suscripción de un convenio y el otorgamiento de becas para el Diplomado Internacional en Ingeniería y Ciencias para la Resiliencia antes los Desastres liderado por el PRS; además destacamos la colaboración con la FACH y sus unidades del Grupo de Operaciones Espaciales (GOE) y el Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea (SAF) en orden a fortalecer un polo de expertos en satélites orientados a estudios de geo-amenazas.

En el marco de la tutoría a la nueva Universidad de Aysén, la Universidad de Chile a través del PRS inició conversaciones con académicos y autoridades de la Región de Aysén para establecer las bases de acuerdo en una propuesta de Observatorio Regional sismológico y un programa de capacitación y formación en sismología. La iniciativa ha tomado fuerza y ya contamos además con el apoyo de SERNAGEOMIN-Coyhaique. Asimismo, en este periodo se creó un comité de académicos e investigadores del PRS-UCHile y de la UAysén para materializar el observatorio regional, asegurar la transferencia tecnológica y poner en marcha un programa de formación experta en temas de amenaza y riesgo sísmico en la Región de Aysén, la cual se materializó en el préstamo de dos sismógrafos y la transferencia de softwares de código abierto para captación de las señales sísmicas.

También destacan las relaciones de trabajo que se han establecido con universidades e instituciones de otros países, lo que permitirá reforzar los vínculos internacionales, abriendo innumerables posibilidades de cooperación en las diversas líneas de investigación del Programa. Como parte de este Informe, además, se da cuenta de las acciones realizadas por el Programa Riesgo Sísmico en el ámbito de la formación continua, especialmente a través del Diplomado de Gestión de Riesgos y Desastres, impulsado desde el PRS con el apoyo de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Agencia de Cooperación Internacional, AGCI, del Ministerio de Relaciones Exteriores. En las dos versiones de este programa (2019 y 2020) participaron representantes de instituciones públicas de Chile y de otros países de América Latina y el Caribe.

Adicionalmente el PRS en este periodo ha impulsado la creación de dos nuevos cursos formales en la Universidad de Chile, uno de Formación General sobre contexto andino y fenómenos extremos: nuevos paradigmas y controversias, dirigido a alumnos de pregrado de todas las carreras y de diferentes facultades y otro de postgrado sobre modelamiento de terremotos y tsunamis, dirigido a alumnos de Magister en Geofísica.

En el último punto de este informe se describen las actividades de extensión y difusión, incluyendo un reporte -síntesis del Proyecto Asociativo Regional, PAR Explora del Ministerio de la Ciencia, impulsado por profesionales del PRS a través de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Con esta línea de trabajo hemos amplificado la divulgación de los temas propios del PRS, así como materias de otras disciplinas, llegando a estudiantes, profesores y comunidades de 22 comunas de la Región Metropolitana, sector sur poniente. Todas las líneas de trabajo tendrán continuidad y se profundizarán para ampliar el impacto del Programa Riesgo Sísmico de la Universidad de Chile.

# I. LÍNEA DE PELIGRO SÍSMICO

## Integrantes equipo investigador

**Investigador Principal:** Sergio Ruiz

**Investigador Senior:** Raúl Madariaga

**Investigadores Asociados:** Bertrand Potin, Francisco Pasten, Katarzyna Slezak, Hermann Schwarze

## Objetivo General

Cuantificar la amenaza sísmica a lo largo de Chile.

## Objetivo Específico

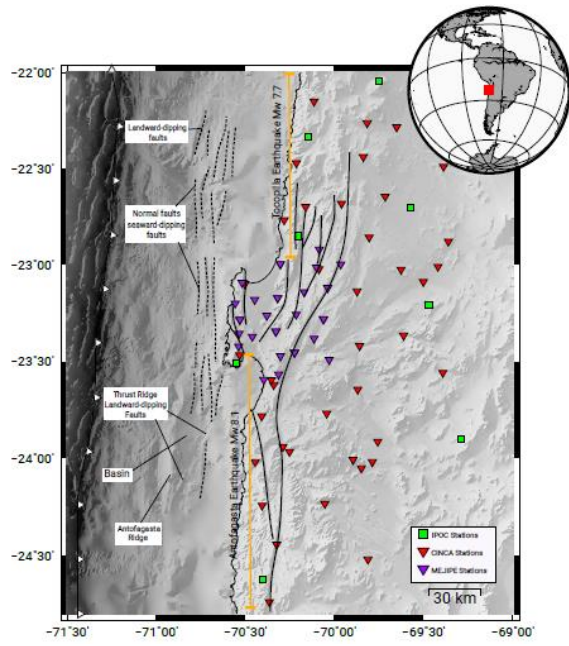
Análisis del peligro sísmico de las zonas Centro Norte y Norte de Chile

## Tareas realizadas

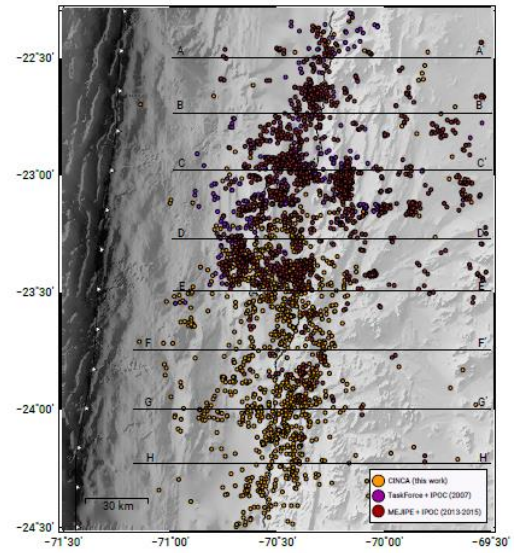
- 1) Estudio de amenaza y tomografía sísmica de la zona Norte de Chile ubicada alrededor de la península de Mejillones (80% de Avance).
- 2) Estudio de amenaza y tomografía sísmica de la zona Centro Norte región de Atacama (50% de Avance).
- 3) Análisis de espectros de terremotos (100% de Avance)

### 1. Estudio de amenaza y tomografía sísmica de la zona Norte de Chile ubicada alrededor de la península de Mejillones

Se utilizaron los datos sísmicos, obtenidos por redes instrumentales instaladas temporalmente en diferentes periodos, alrededor de la península de Mejillones, Figura 1. A partir de estos datos se procedió a localizar la sismicidad de la zona para posteriormente realizar un estudio de tomografía sísmica (Figuras 2 y 3). Los resultados obtenidos aquí han permitido proponer la presencia de una falla tipo "splay-fault" ubicada cerca de la península de Mejillones. La cual permite contextualizar de mejor forma la amenaza sísmica de la zona (Figura 4).

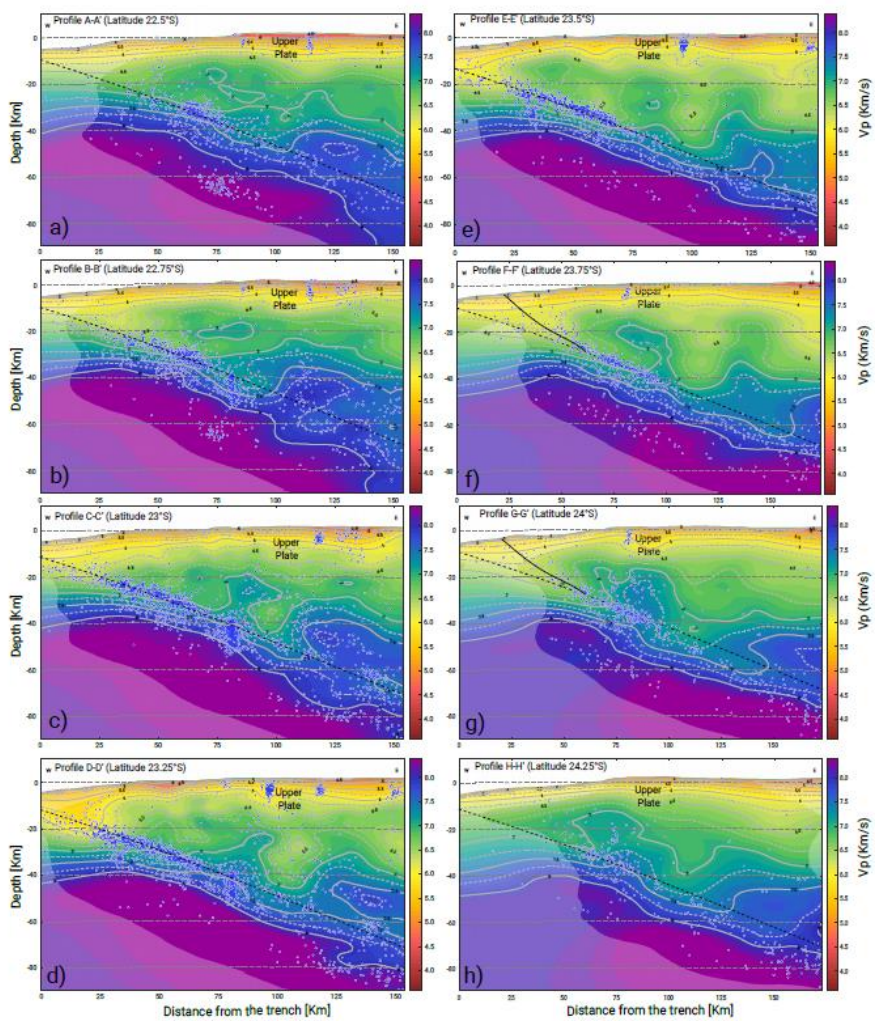


**Figura 1.** Contexto sismo-tectónico de la sismos península de Mejillones. Triángulos son estaciones

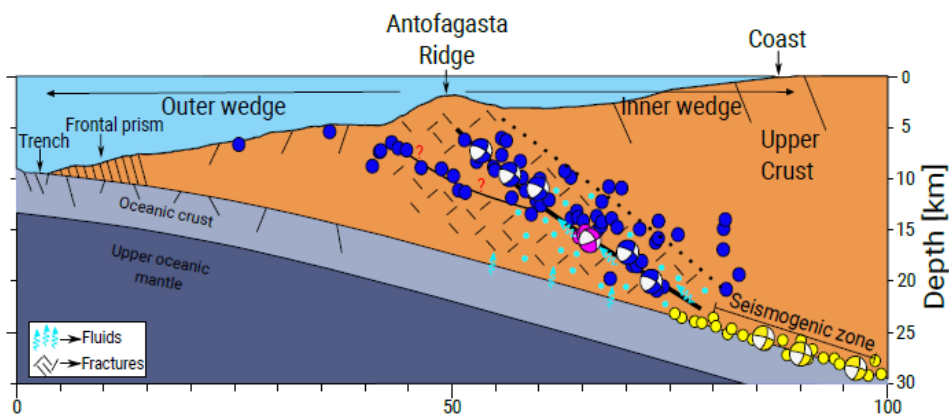


**Figura 2.** Epicentros de utilizados en la tomografía





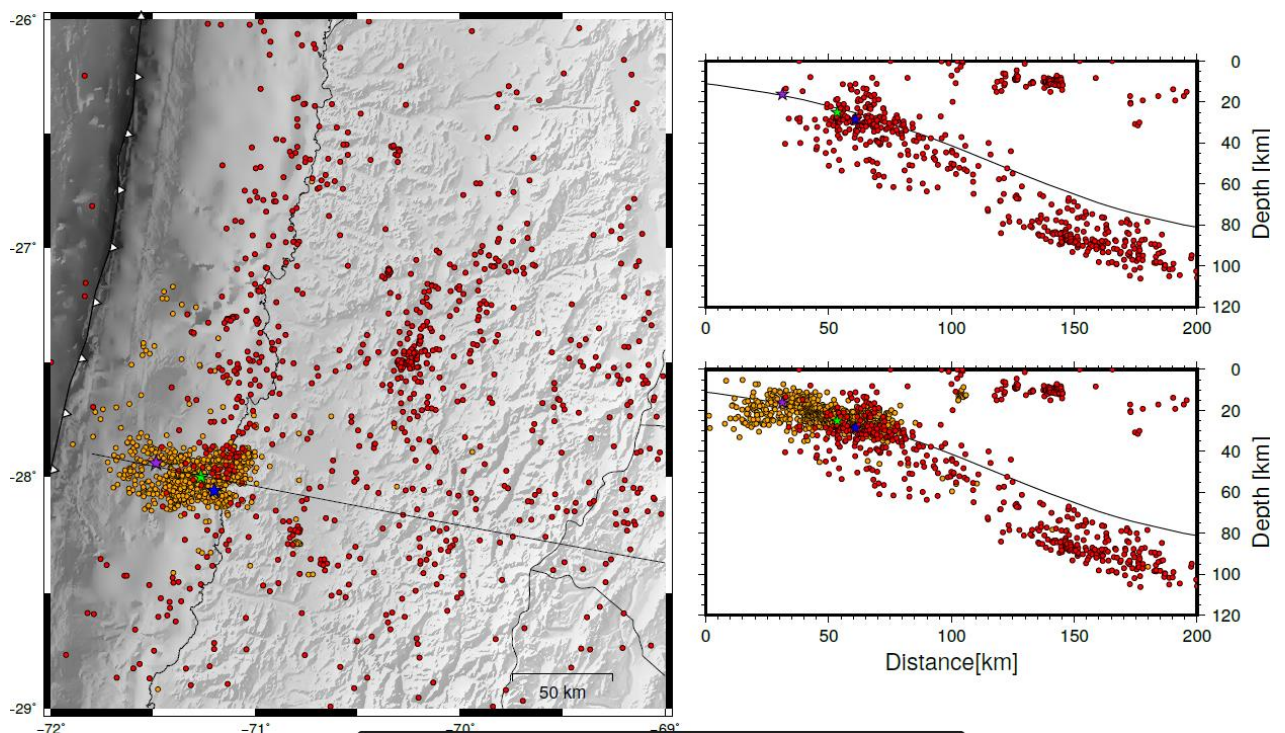
**Figura 3.** Perfiles de velocidad de onda P para la zona de Mejillones



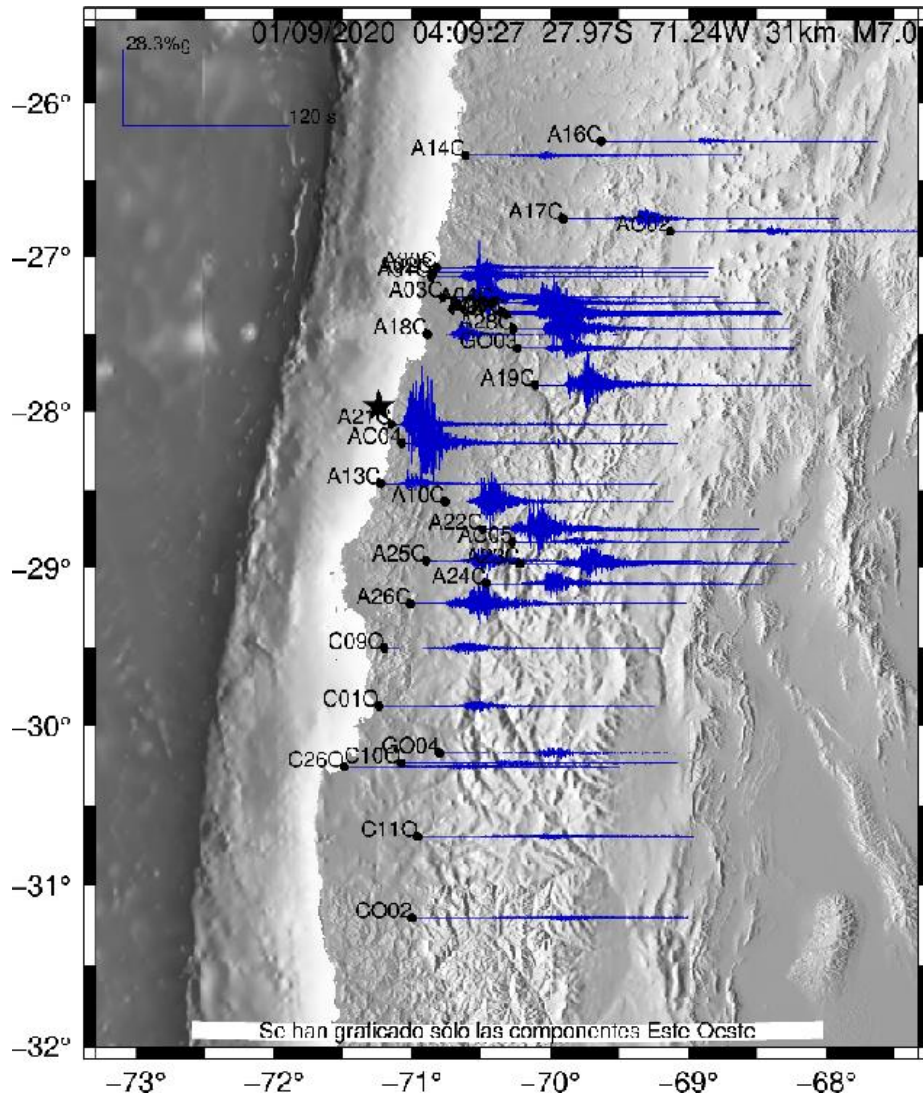
**Figura 4.** Esquema de la sismicidad de la zona Norte de Chile, alrededor de la península de Mejillones.

## 2. Estudio de amenaza y tomografía sísmica de la zona Centro Norte región de Atacama

La zona sismicidad de la zona de Atacama ha sido estudiada durante este periodo localizando alrededor de 1000 eventos sísmicos, Figura 5. Esta sismicidad ha quedado fuertemente controlada por el sismo de magnitud 7.0 que ocurrió el 1 de septiembre de 2020, el cual fue bien registrado por la red de acelerógrafos del Centro Sismológico Nacional, lo que ha permitido realizar los primeros estudios de la fuente de este sismo (Figura 6).



**Figura 5.** Sismicidad localizada en este estudio



**Figura 6.** Registros de aceleraciones obtenidos durante el sismo Mw 7.0 de Atacama 2020.



### 3. Análisis de espectros de terremotos

#### (100% de Avance)

Hemos analizado los espectros de todos los grandes terremotos chilenos, mostrando que ellos no siguen el espectro clásico propuesto en los años 70, si no que estos siguen una ley diferente la que debe ser incorporada en los estudios de amenaza sísmica. Un ejemplo de esta diferencia espectral es mostrado en la Figura 7 donde se observa el registro de la estación CO06 que registró el terremoto de Illapel 2015, Mw 8.3.

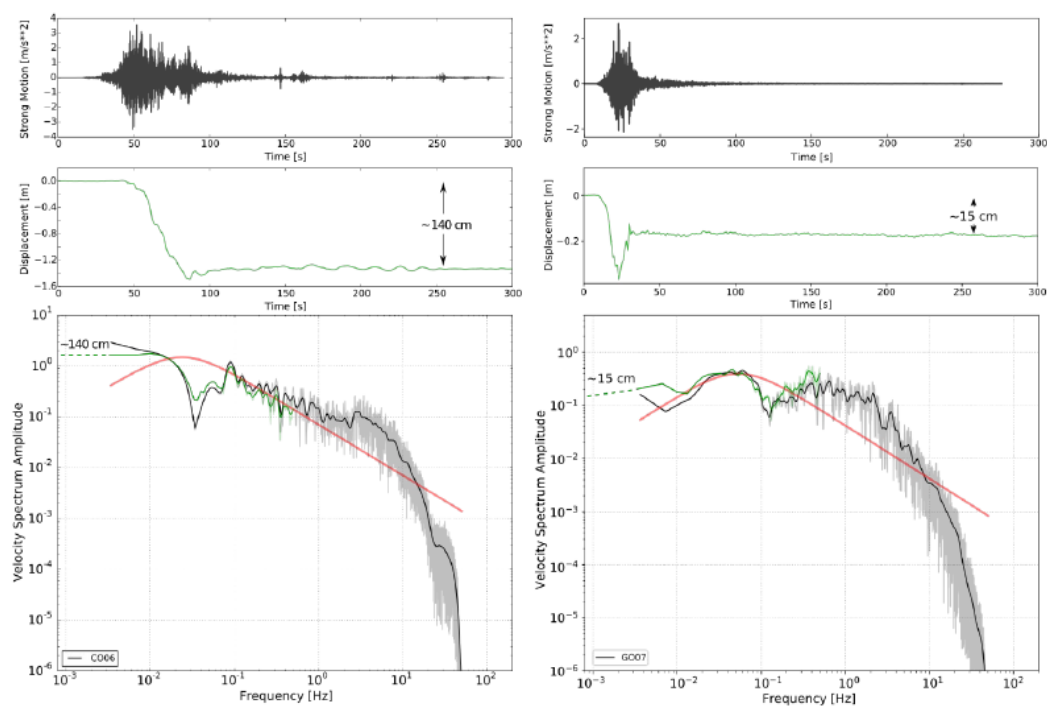


Figura 7. Espectros del registro CO06 del terremoto de Illapel 2015, Mw 8.3

- **Publicaciones del período**

Rivera, E., Ruiz, S., Madariaga, R. (2020) Spectrum of strong-motion records for large magnitude Chilean earthquakes. Enviado a GJI.

Otárola, C., Ruiz, S., Herrera, C., Madariaga, R., Siegel, C.. (2020) Dynamic rupture of subduction earthquakes located near the trench. Enviado a EPSL

Pasten, F., Potin, B., Ruiz, S., Zerbst, L., Aden-Antoniow, F., Azua, F., Rivera, E., Rietbrock, A., Salazar, P. and Fuenzalida, A., 2021. Seismicity in the upper plate of the Northern Chile offshore forearc: Evidence of splay fault around the Mejillones peninsula. Minor revisions in Tectonophysics



## II. LÍNEA TSUNAMI

### Integrantes equipo investigador

<b>Investigador responsable:</b>	Jaime Campos
<b>Investigadores del equipo:</b>	Mauricio Fuentes, Sebastián Riquelme Francisco Bravo
<b>Estudiantes:</b>	Francisco Uribe

### Objetivo general:

Estudiar y comprender el fenómeno tsunami en todos sus aspectos, especialmente en aquellos donde hay una relación con la fuente sísmica.

### Objetivos específicos:

- Obtener nuevas soluciones analíticas.
- Mejorar el entendimiento entre la fuente sísmica y el tsunami.
- Desarrollar metodologías para evaluar el peligro de tsunamis.
- Diseño y mejoramiento de sistemas de alerta de maremotos.
- Comprender y distinguir las fuentes tsunamigénicas de terremotos y remociones en masa.

Los desarrollos de esta línea se dividen en tres distintas categorías que serán descritas a continuación.

### Tareas realizadas y en progreso

A continuación, se describen las actividades realizadas y su estado de avance.

## 1. Modelamiento analítico y numérico

### 1.1. Amplificación de ondas de tsunamis por fuentes lentas

- Estado de Avance: 100%

En los últimos años, se ha hecho cada vez más claro que las propiedades temporales de la fuente sísmica no siempre pueden ser ignoradas. Para efectivamente caracterizar esta dependencia, se ha diseñado un modelo analítico 2D que consiste en un océano plano con una fuente sísmica finita, en tiempo y espacio. En este caso, se puede obtener una solución analítica en el dominio de frecuencias:

$$\widehat{\eta}(k_x, k_y, t) = \frac{\widehat{\zeta}_0^x(k_x)}{\cosh(kh)} \frac{V_r^2}{t_R} [\phi(t) - \phi(t - t_R)] \quad (1)$$

con

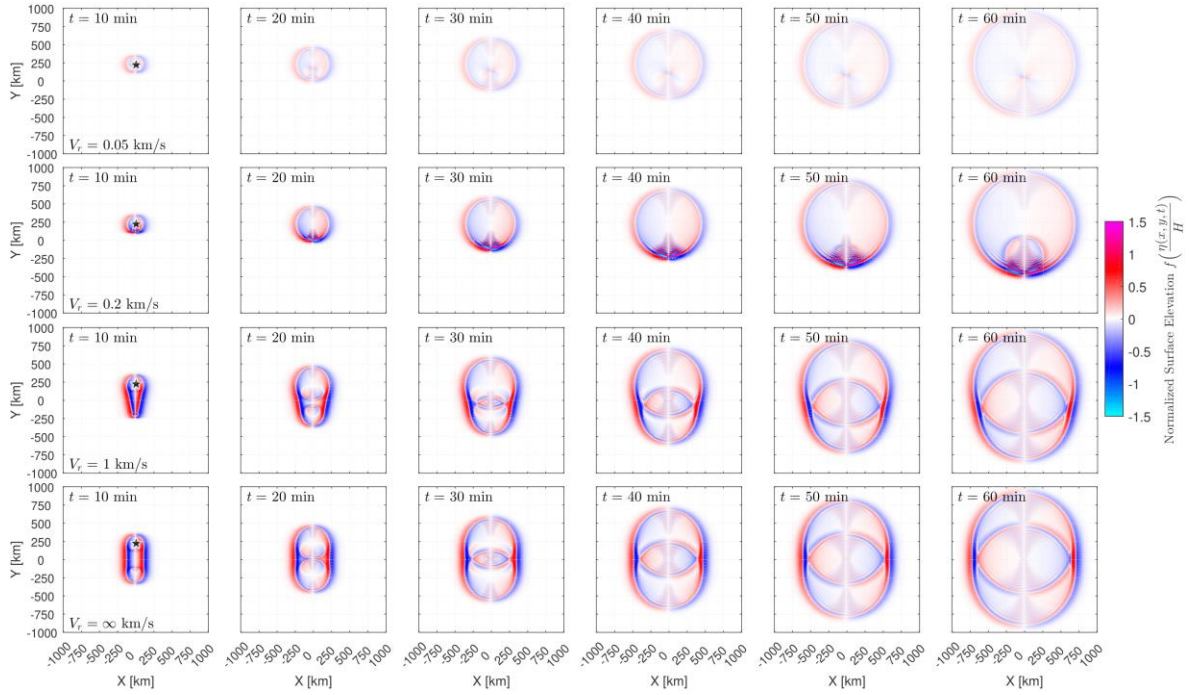
$$\begin{aligned} \phi(t) = & \frac{2}{V_r} p(t, 0) - \frac{1}{V_r} \cos(L_2 k_y) p(t, t_2) + k_y \sin(L_2 k_y) q(t - t_2) - \frac{1}{V_r} \cos(L_1 k_y) p(t, t_1) + k_y \sin(L_1 k_y) q(t - t_1) \\ & + i \left\{ -\frac{1}{V_r} \sin(L_2 k_y) p(t, t_2) - k_y \cos(L_2 k_y) q(t - t_2) + \frac{1}{V_r} \sin(L_1 k_y) p(t, t_1) + k_y \cos(L_1 k_y) q(t - t_1) \right\} \end{aligned}$$

$$t_i = \frac{L_i}{V_r}, \quad i \in \{1, 2\}$$

$$q(a, b, t) =: \frac{\mathcal{H}(t)}{a^2 - b^2} \left( \frac{\sin(bt)}{b} - \frac{\sin(at)}{a} \right)$$

$$p(a, b, t, t_0) =: \partial_t q(a, b, t - t_0)$$

La solución es simple y no requiere esfuerzos computacionales mayores para ser evaluada. Los resultados de los experimentos numéricos confirman que existe un rango de velocidades de la fuente, cercanas a la velocidad de propagación del tsunami, en que la amplificación es máxima, especialmente en los extremos de la falla según el sentido de propagación de la fuente.



**Figura 1: Solución analítica para diferentes velocidades de la fuente a distintos tiempos de propagación.**

Para el caso 1D, cuando se descarta el efecto de la dispersión de ondas, es posible obtener una expresión cerrada y exacta para la forma de onda en función del tiempo

$$\eta(y, t) = \frac{v^2 H}{\pi(1 - v^2)} \left[ \psi(y - V_r t, 0) + \psi(ct - y, 0) + \left(\frac{1}{v} - 1\right) \psi(ct, y) + \mathcal{H}(t') \{ \psi(L + V_r t' - y, 0) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{v} - 1\right) \psi(y - L + ct', 0) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{v} + 1\right) \psi(y - L - ct', 0) \} \right] \quad (2)$$

donde

$$t' = t - L/V_r.$$

$$v = \frac{V_r}{c}$$

$$\psi(x, y) = \arctan\left(\frac{\sinh\left(\frac{\pi x}{2h}\right)}{\cosh\left(\frac{\pi y}{2h}\right)}\right)$$

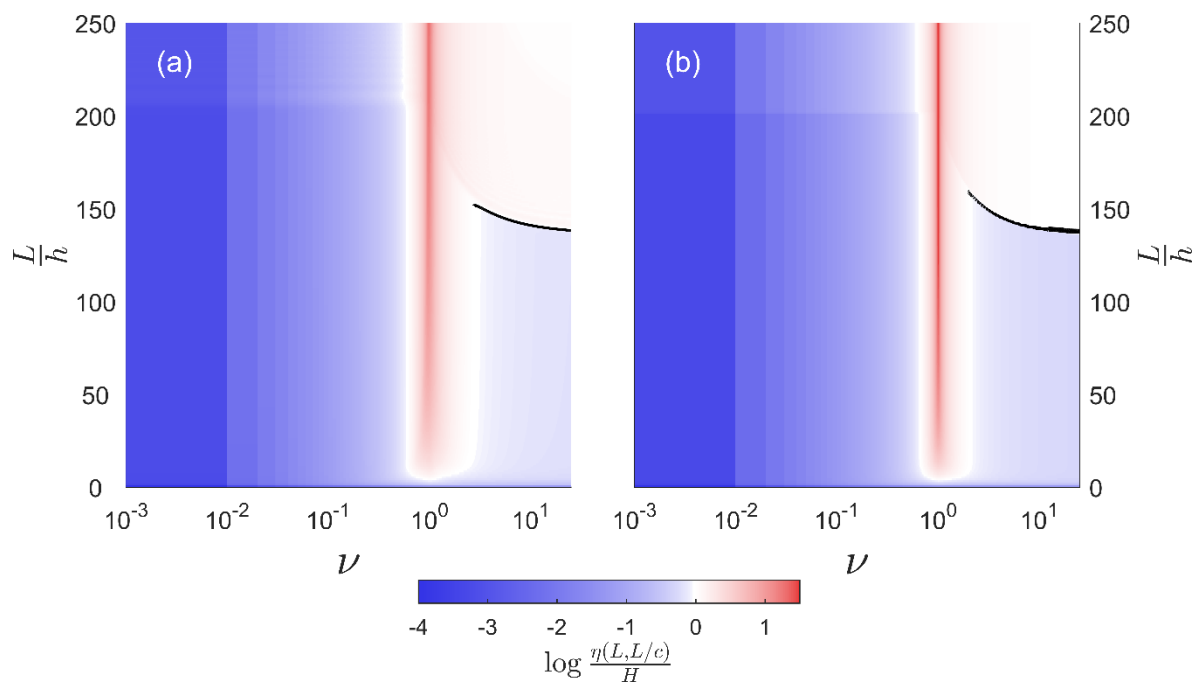


Figura 2: Máxima amplificación de tsunami en función del largo y velocidad de la fuente.

## 1.2. Eficiencia de Tsunamis

- Estado de Avance: 95%

Como se ha visto, los parámetros temporales de la fuente pueden llegar a ser decisivos al momento de generar un tsunami. Para caracterizar eventos con un mayor potencial,

en este sentido, se ha empleado el uso de un concepto físico llamado *Eficiencia energética*. Este estudio extiende este concepto a situaciones más generales y permite estudiar tanto de forma analítica como numérica, una gran variedad de casos.

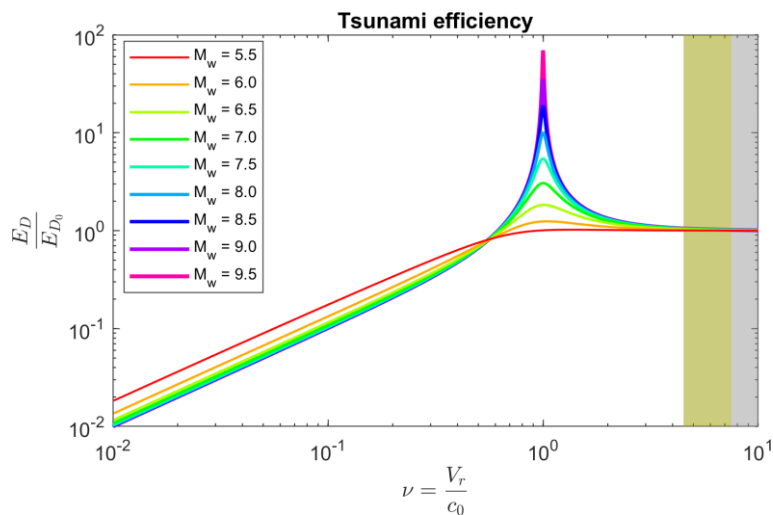
La eficiencia se define como

$$f = \frac{E_D}{E_{D_0}} \quad (3)$$

donde,

$$E_D = \rho g \iint_S \zeta_t(x, y, t) \eta(x, y, t) dx dy dt$$

$$E_{D_0} = \lim_{V_r \rightarrow \infty} E_D$$



**Figura 1: Eficiencia de Tsunami en función de la velocidad de ruptura del terremoto. Las franjas verticales marcan los rangos usuales de terremotos.**

### 1.3. Estudios analíticos de tsunamis por deslizamientos de tierra

**Estado de Avance: 30 %**

Se propone un modelo 2+1D para tsunamis generados por deslizamientos de tierra submarinos es tratado basados en la teoría potencial lineal. El deslizamiento de tierra submarino es modelado de la siguiente manera,



$$\xi(x, y, t) = A M_{[0, T]}(t) H[(x - vt)(L + vt - x)] H\left[\left(y + \frac{W}{2}\right)\left(\frac{W}{2} - y\right)\right]$$

Con:

$$M_{[0, T]}(t) = \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) H[t(T - t)]$$

La solución semi-analítica obtenida en este estudio es,

$$\hat{\eta}(k_x, k_y, t) = \zeta(k_x, k_y) \left\{ g_1(t^* = t - T) + g_1(t^* = t) \right. \\ \left. + i \frac{k_x v T}{\pi} \left[ g_2(t^* = t - T) + g_2(t^* = t) \right] \right\}$$

Donde:

$$g_1(t^* = t - T) = \frac{H(t - T)}{2 \left[ \omega^2 - \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right)^2 \right]} \left\{ e^{i k_x v T} \left[ -i \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right) \cos[\omega(t - T)] \right. \right. \\ \left. \left. + \omega \sin[\omega(t - T)] \right] + i \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right) e^{i \left[ k_x v t + \frac{\pi}{T}(t - T) \right]} \right\} \\ + \frac{H(t - T)}{2 \left[ \omega^2 - \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right)^2 \right]} \left\{ e^{i k_x v T} \left[ -i \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right) \cos[\omega(t - T)] \right. \right. \\ \left. \left. + \omega \sin[\omega(t - T)] \right] + i \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right) e^{i \left[ k_x v t - \frac{\pi}{T}(t - T) \right]} \right\}$$

$$g_1(t^* = t) = \frac{H(t)}{2 \left[ \omega^2 - \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right)^2 \right]} \left\{ -i \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right) \cos(\omega t) + \omega \sin(\omega t) \right. \\ \left. + i \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right) e^{i \left[ k_x v + \frac{\pi}{T} \right] t} \right\} + \frac{H(t)}{2 \left[ \omega^2 - \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right)^2 \right]} \left\{ \omega \sin(\omega t) \right. \\ \left. - i \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right) \cos(\omega t) + i \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right) e^{i \left[ k_x v - \frac{\pi}{T} \right] t} \right\}$$

$$g_2(t^* = t - T) = \frac{H(t - T)}{2i \left[ \omega^2 - \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right)^2 \right]} \left\{ e^{ik_x v T} \left[ -i \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right) \cos [\omega(t - T)] \right. \right. \\ \left. \left. + \omega \sin [\omega(t - T)] \right] + i \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right) e^{i \left[ k_x v t + \frac{\pi}{T} (t - T) \right]} \right\} \\ - \frac{H(t - T)}{2i \left[ \omega^2 - \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right)^2 \right]} \left\{ e^{ik_x v T} \left[ -i \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right) \cos [\omega(t - T)] \right. \right. \\ \left. \left. + \omega \sin [\omega(t - T)] \right] + i \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right) e^{i \left[ k_x v t - \frac{\pi}{T} (t - T) \right]} \right\}$$

$$g_2(t^* = t) = \frac{H(t)}{2i \left[ \omega^2 - \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right)^2 \right]} \left\{ -i \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right) \cos (\omega t) + \omega \sin (\omega t) \right. \\ \left. + i \left( k_x v + \frac{\pi}{T} \right) e^{i \left[ k_x v + \frac{\pi}{T} \right] t} \right\} - \frac{H(t)}{2i \left[ \omega^2 - \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right)^2 \right]} \left\{ \omega \sin (\omega t) \right. \\ \left. - i \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right) \cos (\omega t) + i \left( k_x v - \frac{\pi}{T} \right) e^{i \left[ k_x v - \frac{\pi}{T} \right] t} \right\}$$

A continuación, se propone otro modelo 2+1D para tsunamis generados por deslizamientos de tierra submarinos, cuya ecuación gobernante también es la teoría potencial lineal. El deslizamiento de tierra submarino es modelado de la siguiente manera,

$$\xi(x, y, t) = A M_{[0, T]}(t) H \left[ \left( y + \frac{W}{2} \right) \left( \frac{W}{2} - y \right) \right] H[(x - vt)(L - x + vt)]$$

Donde:

$$M_{[0, T]}(t) = \frac{t}{\delta} H[t(\delta - t)] + H[(t - \delta)(T - \delta - t)] + \frac{T - t}{\delta} H[(T - t)(t - T + \delta)]$$

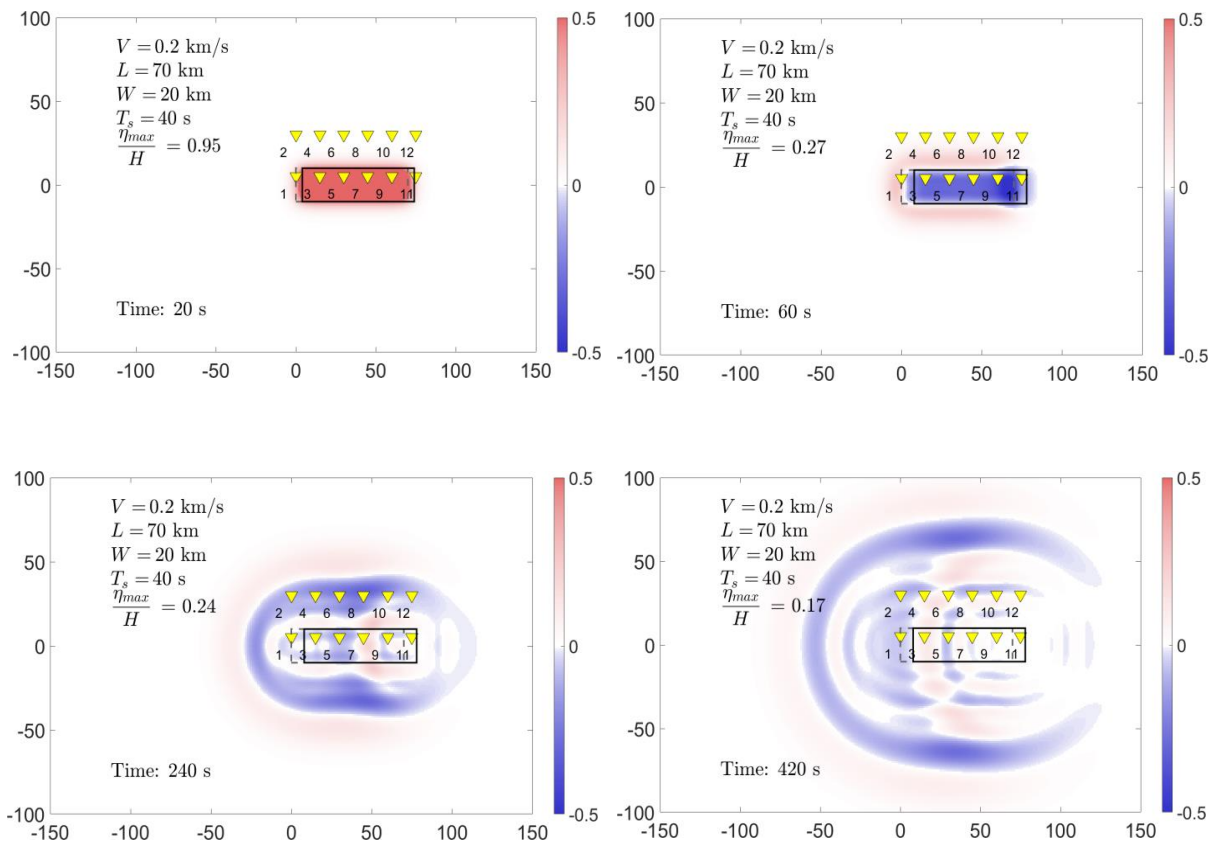
Para el segundo modelo propuesto la solución semi analítica encontrada es,

$$\hat{\eta}(k_x, k_y, t) = \frac{\zeta(k_x, k_y)}{\delta} \left\{ F(t) - F(t - \delta) + e^{ik_x v T} \left[ F(t - T) - F(t - T + \delta) \right] \right\}$$

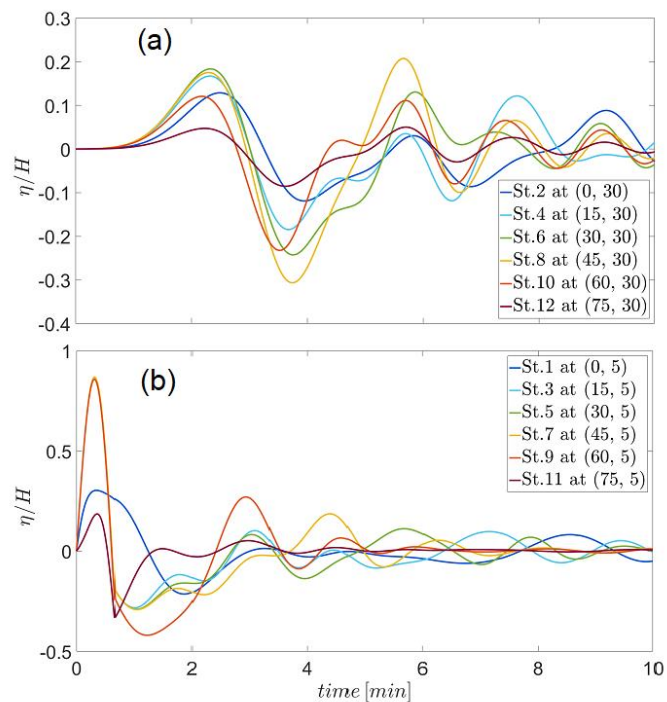
Con:

$$\begin{aligned} \frac{F(t) - F(t - \delta)}{\delta} &= \frac{e^{ik_x vt}}{\delta} \left\{ (1 + ik_x vt) \int_{t-\delta}^t \cos(\omega \tau) e^{-ik_x v \tau} d\tau \right. \\ &\quad - ik_x v \int_{t-\delta}^t \tau \cos(\omega \tau) e^{-ik_x v \tau} d\tau \\ &\quad \left. + ik_x v \delta \int_0^{t-\delta} \cos(\omega \tau) e^{-ik_x v \tau} d\tau \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{F(t - T) - F(t - T + \delta)}{\delta} &= \frac{e^{ik_x vt}}{\delta} \left\{ ik_x v \int_{t-T}^{t-T+\delta} \tau \cos(\omega \tau) e^{-ik_x v \tau} d\tau \right. \\ &\quad - [1 + ik_x v(t - T)] \int_{t-T}^{t-T+\delta} \cos(\omega \tau) e^{-ik_x v \tau} d\tau \\ &\quad \left. - ik_x v \delta \int_0^{t-T+\delta} \cos(\omega \tau) e^{-ik_x v \tau} d\tau \right\} \end{aligned}$$



**Figura 1: Capturas de la modelación 2+1D para un tsunami generado por un deslizamiento cuya fuente en el tiempo es sinusoidal para distintos instantes de tiempo. Los triángulos invertidos de color amarillo corresponden a las estaciones virtuales.**



**Figura 2: Serie de tiempo de la altura de la superficie libre. (a) Estaciones pares. (b) Estaciones impares.**

Los modelos 2+1D realizados evidencian que es importante considerar una función suave para la modelación en el tiempo del deslizamiento de tierra, pues como se visto en estudios previos del PRS, la modelación en el tiempo a través de curvas discontinuas genera singularidades no físicas al inicio y fin del movimiento, asociado a la abrupta iniciación y frenado del movimiento (aceleraciones infinitas).

## 2. Alerta temprana

### 2.1 Implementación de sistema de alerta temprana de tsunamis

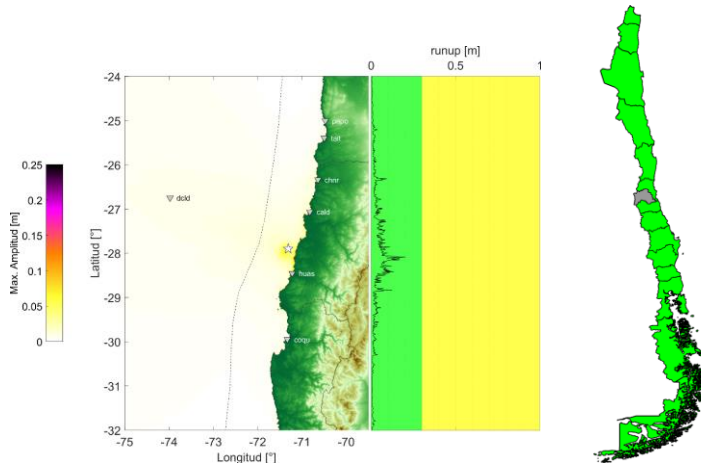
**Estado de Avance: 50%**

Los sistemas de alerta de tsunamis requieren información sísmica sensible. Si por el momento, se separa este problema en dos partes, es posible enfocarse en la respuesta rápida asumiendo como dato de entrada la fuente sísmica.



Este sistema está basado en los trabajos realizados en el período PRS-2019, y aplica las ecuaciones lineales de aguas poco profundas, en una grilla de 30 segundos de arco.

Esto pudo ser puesto a prueba con el pasado evento del 01-09-2020, en Huasco de magnitud Mw 7.0.



**Figura 1: Resultado semiautomático del sistema de alerta rápida. El sistema arrojó que el terremoto de Huasco/Vallenar no produjo un Tsunami sensible.**

Este sistema aún requiere estar 100% en línea y comunicado con la fuente de información sísmica que alimente los códigos.

Otro evento puesto a prueba corresponde al Terremoto de Alaska del 22-07-2020, de magnitud Mw 7.8. La fuente sísmica fue invertida y trabajada por colaboradores del Centro Sismológico Nacional (CSN). Dicha fuente es la que se usa como input para el sistema de alerta. Nuevamente, este evento no produjo un tsunami que amenazara las zonas costeras cercanas.

Se requiere mantener un período de prueba para verificar el desempeño del sistema ante posibles diagnósticos errados. Sin embargo, todas las pruebas a la fecha muestran resultados prometedores.

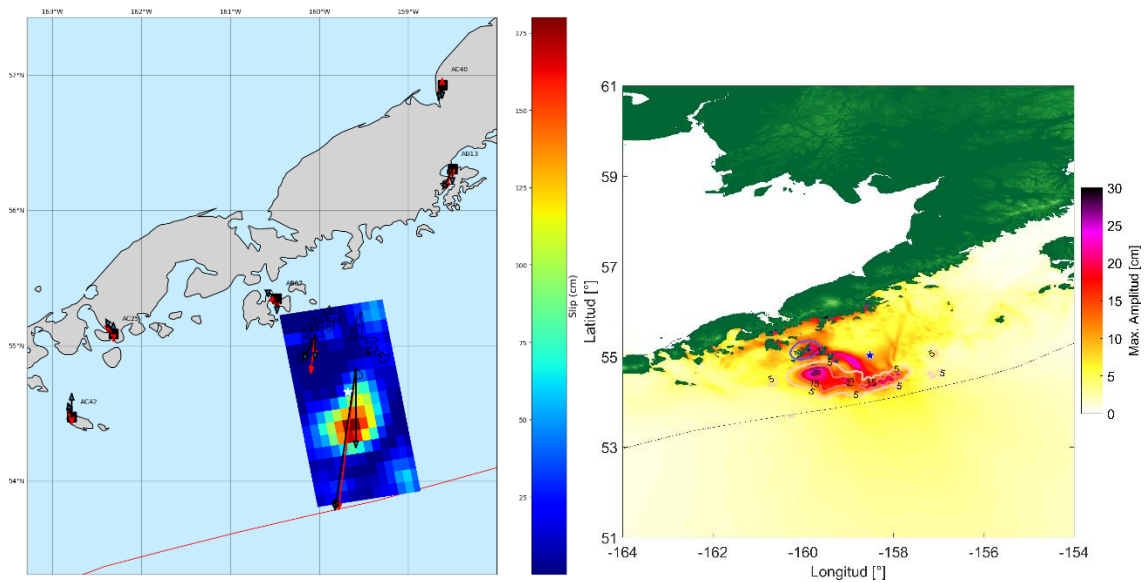


Figura 2: Evaluación del terremoto de Alaska con colaboración del CSN.

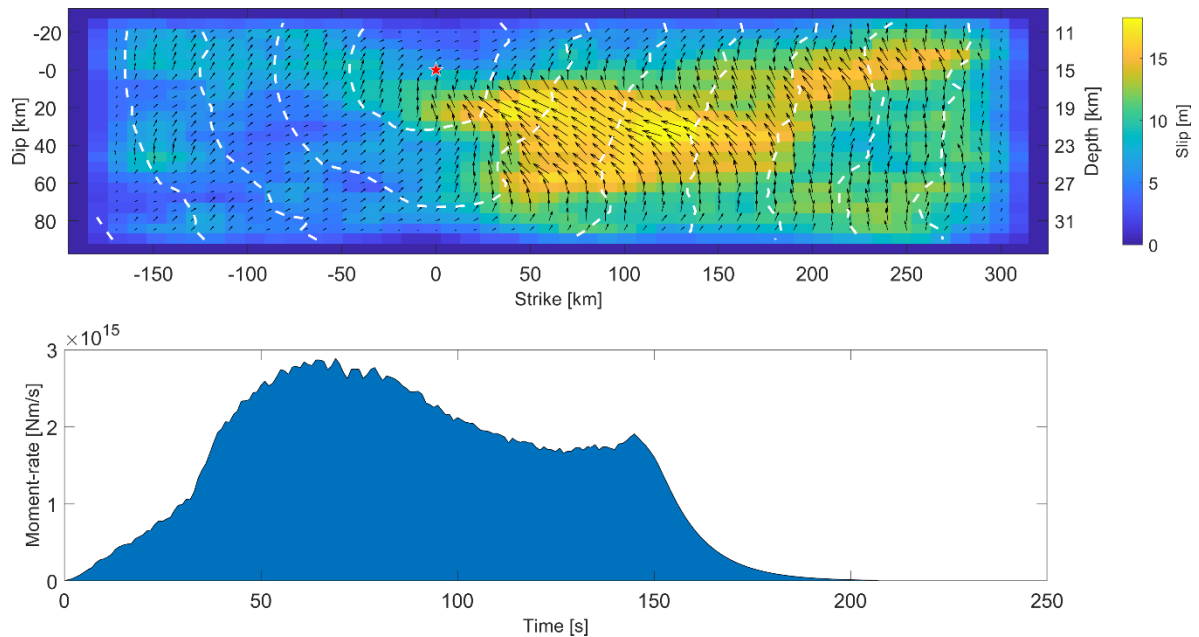
### 3. Peligro Tsunamigénico

#### 3.1 Fuentes Estocásticas Cinemáticas

##### Estado de Avance: 25%

Las fuentes estocásticas son una de las herramientas más usadas para el estudio probabilístico de Tsunamis. Su diseño requiere la inclusión del conocimiento de las propiedades físicas de un terremoto. Para este fin, se han incorporado significativas mejoras a las actuales fuentes, por ejemplo, incluyendo la cinemática de la ruptura.

Esta herramienta será probada en una zona a determinar para evaluar la capacidad de considerar las incertidumbres asociados a los distintos parámetros sísmicos.



**Figura 1: Realización de fuente estocástica con cinemática de la ruptura y dirección de deslizamiento (rake).**

## 4. Caracterización de la fuente tsunamigénica

### 4.1 El terremoto y Tsunami de Melinka, 2016

**Estado de Avance: 60%**

Mediante un estudio colaborativo entre distintos científicos sismólogos y geodestas, se ha reevaluado el Terremoto de Melinka 2016, ocurrido al norte del pueblo de Melinka y al extremo sur del archipiélago de Chiloé.

Distintos integrantes del PRS y colaboradores del CSN contribuyeron con su experticia multidisciplinaria al reevaluar dicho evento sísmico. Tales acciones implicaron tareas como:

- Relocalizar el evento principal con mejores modelos de estructura de la tierra local.
- Inversión de la fuente con datos de ondas sísmicas
- Modelamiento de interferometría de radar (INSAR)
- Inversión de la fuente con datos geodésicos
- Modelamiento del tsunami instrumental

- Pruebas de resolución de los datos
- Inversión conjunta de la fuente con todos los datos

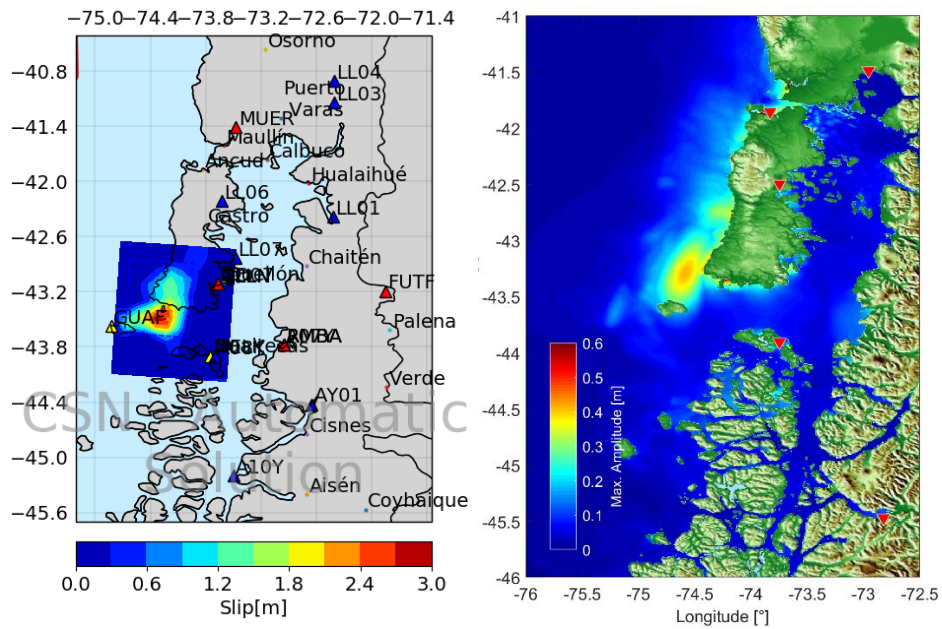


Figura 1: Modelo de inversión conjunta de la fuente sísmica y alturas máxima del Tsunami.

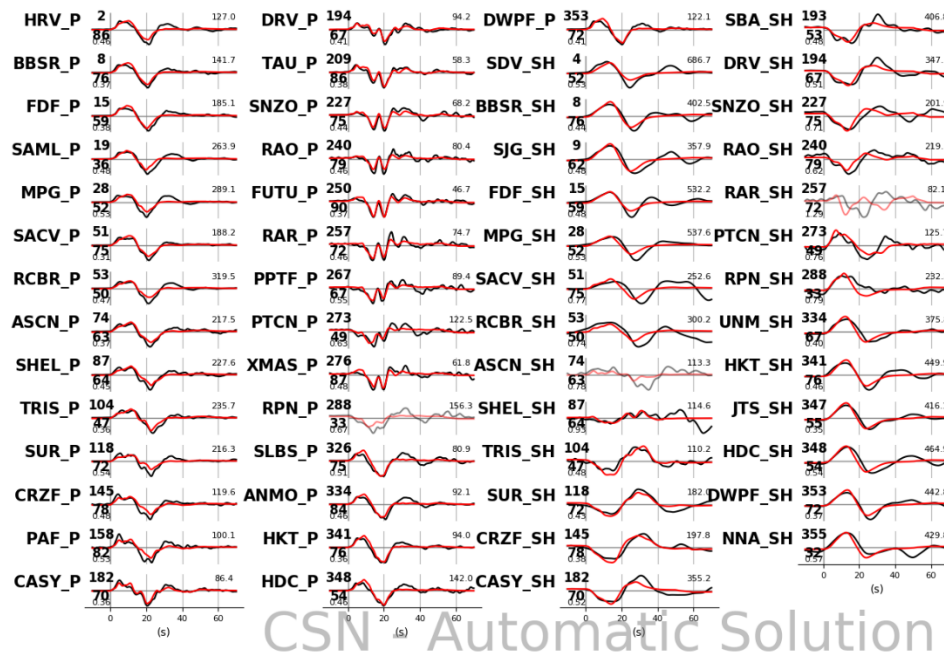


Figura 2: Ajuste de las señales sísmicas usadas en la inversión

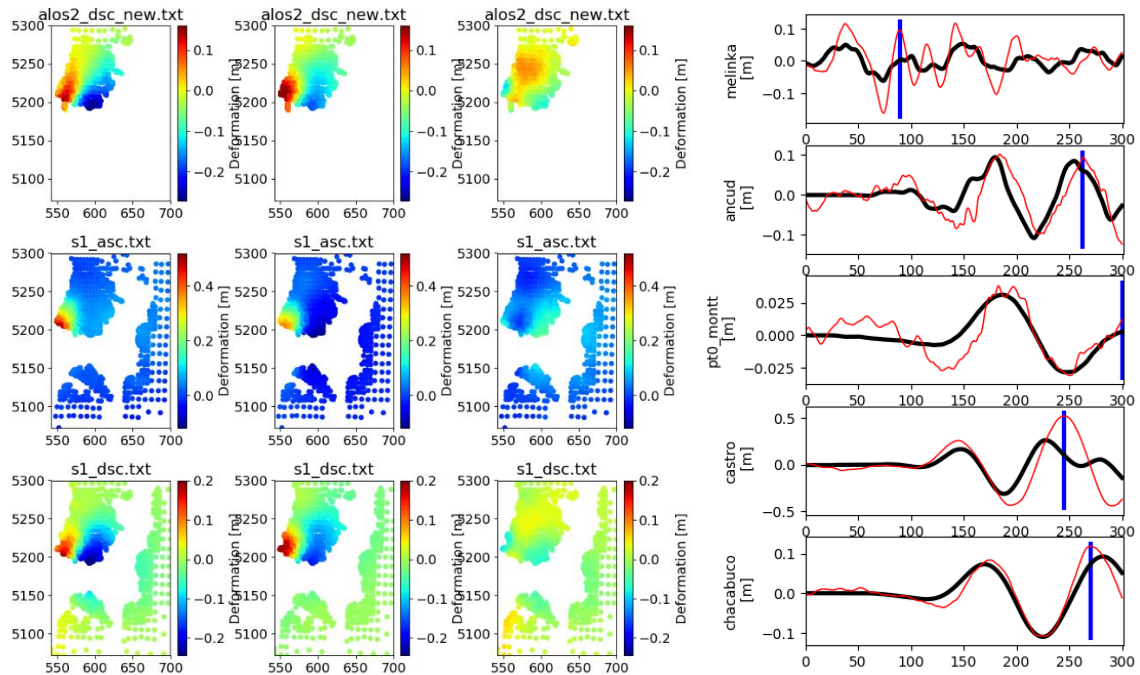


Figura 3: Ajuste de las fases ascendentes y descendentes de las imágenes satelitales (INSAR) y de los mareógrafos que registraron el tsunami instrumental.



## 5. Observaciones y futuros avances

Los estudios realizados han fortalecido el capital humano en materia de tsunami, dando como resultado tres nuevos magister en el área. Además, de esta línea, se han desprendido publicaciones científicas en revistas indexadas:

- Riquelme, S., and Fuentes, M. (2020). *Tsunami Efficiency due to Very Slow Earthquakes*. Seismological Research Letters. In review.
- Fuentes M., Uribe, F., Riquelme, S., and Campos, J. (2020). *Analytical Model for Tsunami Propagation including Source Kinematics*. Pure Appl. Geophys. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02528-7>.
- Riquelme S., Schwarze H., Fuentes M., and Campos J. (2020). *Near Field Effects of Earthquake Rupture Velocity into Tsunami Run-up Heights*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125, e2019JB018946.

Estos estudios han culminado con el aporte de nuevos conocimientos y aprendizajes respecto de un área muy importante para Chile.

En el futuro, se propone implementar nuevos métodos que permitan incluir adecuadamente los parámetros temporales de la fuente para realizar simulaciones rutinarias. También, estudios en materia de tsunamis en fiordo revelan la enorme dificultad de este problema y dónde debemos poner nuestros futuros esfuerzos, dado que corresponde a una realidad en la Patagonia chilena. Otro lugar de interés para los próximos estudios es el territorio antártico chileno.

### III. SISTEMAS COMPLEJOS PARA ESTIMAR PELIGRO SÍSMICO

**Integrantes equipo investigador:** Jaime Campos, Benoit Derode, Cristián Siegel, Patricio Toledo

#### Objetivos

Esta línea de investigación se basa en desarrollar metodologías innovadoras para el análisis de la sismicidad en Chile, con el objetivo de caracterizar y estimar el peligro sísmico en el territorio nacional. Esto comprende por una parte analizar la información contenida en catálogos sísmicos modernos utilizando herramientas provenientes de la física de sistemas complejos. Por otra parte, comprende la transferencia de aprendizajes de la teoría de sistemas complejos para la comunicación del riesgo de desastre por sismos en Chile.

#### Tareas Realizadas y estado de avance:

##### 1. Estimación del peligro sísmico en Chile:

**80 % de avance**

Elaboración de informe “Mapeo Fractal del Peligro Sísmico en Chile” (entrega próxima). Utiliza un método de estimación de peligro sísmico basado en la evidencia de la distribución fractal de los epicentros (Scaling Coefficients Estimation, Kobbosokov & Mazhekov 1988). Se aplicó en el territorio continental de Chile, utilizando el catálogo de Poulos et al, 2018. Este método no necesita una zonificación previa y permite cuantificar la peligrosidad sísmica en la escala espacial de interés, sea aquella correspondiente al área de una región, provincia o comuna.

##### 2. Desarrollo de una herramienta pronosticadora de aumento de sismicidad

**50% de avance**

- Estudio del estado del arte de la predictibilidad de terremotos.
- Conceptualización del uso de la interpretación dinámica de métodos de Monte Carlo para el modelamiento de la sismicidad.

- Implementación de métrica para detectar puntos críticos en sistemas que disipan energía en forma de avalanchas multi-escala.
- Se aplicó preliminarmente al análisis de la sismicidad en Chile.

### 3. Modelamiento matemático de catálogos sísmicos

#### 60 % de avance

- Repositorio de rutinas computacionales en python desarrolladas por integrantes del equipo (<https://github.com/stegca>).
- Estudio del estado del arte en la teoría analítica de los tiempos de recurrencia de los terremotos y sus consecuencias para la estimación del peligro sísmico.
- Planteamiento de un estudio de modelamiento de la recurrencia sísmica en Chile utilizando alternativas al proceso de Poisson utilizado en la metodología PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment) (60 % de avance)

### 4. Formación en metodología del estado del arte en estimación del riesgo sísmico

A través de la participación en el Curso de Evaluación Probabilista del Riesgo de Desastres para Especialistas e Investigadores de América Latina y el Caribe, dictado en modalidad online por Ingeniar Risk en colaboración con la Florida International University. (100 % de avance, curso terminado)

### 5. Difusión

- Elaboración de 3 artículos de difusión para la página web del PRS.
- Página informativa de la línea de investigación en web PRS.

### Observaciones y futuros avances

- El “Mapeo Fractal del Peligro Sísmico en Chile” aún se encuentra en fase de computación. En el informe se entregará la estimación de la intensidad sísmica por comunas, provincias y regiones con intervalos de confianza, a comparar con resultados obtenidos con metodologías clásicas.
- El equipo seguirá avanzando en publicar los estudios en revistas internacionales.

- Se inició una colaboración con Denis Legrand (UNAM, México) para analizar dinámica espaciotemporal de la secuencia sísmica de Aysén 2007.

## Imágenes

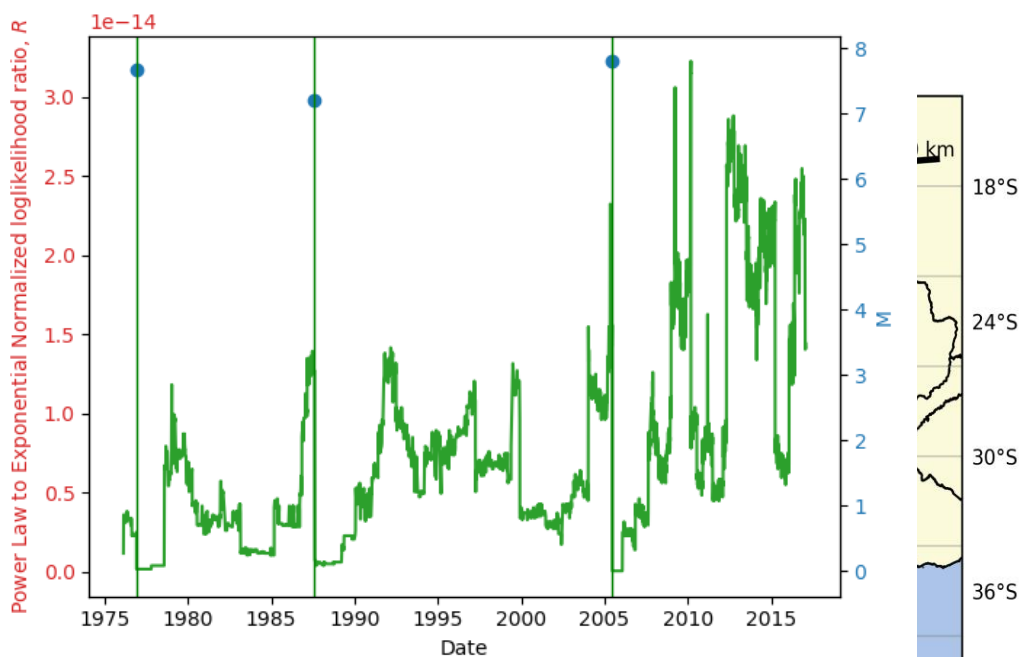


Figura 2: Aplicación preliminar de una métrica de detección de puntos críticos a la sismicidad de profundidad intermedia.

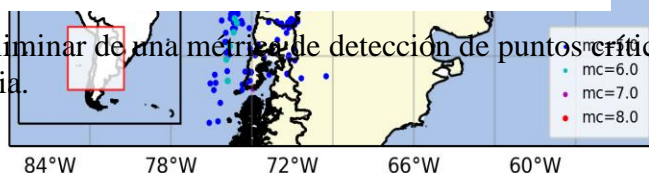


Figura 1:

Mapa de la sismicidad en Chile en los años 1974-2017 desde el catálogo del NEIC, utilizado para la estimaciones de peligro sísmico en territorio nacional. La imagen fue elaborada con rutinas propias desarrolladas en el PRS del repositorio STEQCA, Spatio-Temporal Earthquake Catalog Analysys Routines.

## Publicaciones del período

<https://prs.dgf.uchile.cl/modelamiento-de-la-sismicidad-desde-el-punto-de-vista-de-los-sistemas-complejos/>

<https://prs.dgf.uchile.cl/la-integracion-de-las-ciencias-ante-los-desafios-de-la-sociedad-moderna/>

- “Dynamic rupture of subduction earthquakes located near the trench”. C. Otarola, S. Ruiz, C. Herrera, R. Madariaga and C. Siegel. Submitted to Earth and Planetary Science Letters, 2020.

## **IV. ANÁLISIS DE TERREMOTOS CON SEÑALES SATELITALES, MAREÓGRAFOS Y SISMÓMETROS**

### **Integrantes Equipo Investigador**

**Investigador responsable:** Jaime Campos

**Investigadores del equipo:** Sophie Peyrat, Francisco Bravo, Francisco Delgado, Mauricio Fuentes, Benoit Derode, Adriana Pérez

### **Introducción**

Una tarea prioritaria hoy es desarrollar capacidades y competencias propias en Chile para el análisis y estudio de los procesos físicos de los terremotos, utilizando las nuevas tecnologías y señales obtenidas desde satélites, mareas oceánicas y registros de estaciones sismológicas convencionales. Esto es fundamental para la robustez y confiabilidad en la determinación del tamaño de del terremoto o zona de ruptura, identificar el tipo de mecanismo en la fuente sísmica y estimar la distribución de la liberación de energía sobre el plano de falla. Para terremotos cuyo mecanismo corresponde a eventos interplaca tipo “thrust”, con epicentro costero, la determinación del deslizamiento sísmico sobre la falla es clave para identificar si el evento puede llegar a producir un tsunami. La dimensión lateral de la zona de ruptura sísmica y su extensión en profundidad son también fundamentales para comprender la capacidad de producir tsunami. Por lo tanto, la resolución de los procesos de la fuente sísmica son un problema central en países altamente expuestos a la amenaza sísmica y la contribución al desarrollo y mejoras de las técnicas de inversión e imágenes de la fuente, un objetivo constante y prioritario.

### **Objetivos**

Desarrollo de una metodología para el estudio global de Terremotos, desde la localización hasta la inversión de la fuente sísmica, utilizando todos los datos sísmicos disponibles, generados por instrumentos sismológicos convencionales (sismómetros y acelerógrafos) en el campo cercano, intermedio y lejano, así como también los satelitales geodésicos (cGPS e InSAR) y de tsunami (mareógrafos), todos ellos disponibles desde la Red Sismológica Nacional, así como también los de la red mundial de estaciones sismológicas. Una tarea específica de esta línea de investigación es desarrollar una metodología propia en Chile que permita, además de la combinación y análisis conjunto

de datos de naturaleza física diferente, su integración en algoritmos basados en la técnica de métodos inversos para describir de manera confiable el detalle del proceso de ruptura de la fuente sísmica. Un objetivo secundario es la articulación y animación de un equipo de investigación entre las líneas del PRS.

#### Tareas realizadas

En una primera etapa se implementaron técnicas de inversión para analizar la fuente sísmica utilizando los datos separadamente de distinta naturaleza física correspondiente a registros del terremoto de Melinka del 25 de Diciembre de 2016, Mw7.6. Esta primera etapa permitió obtener los primeros resultados que animaron una discusión y análisis claves sobre la resolución aportada por cada tipo de señal sísmica, utilizando algoritmos clásicos de inversión para iluminar aspectos del proceso de ruptura sísmica y resolviendo de manera robusta el mecanismo del terremoto. Este terremoto, ocurrido en el extremo Sur de la Isla de Chiloé, tuvo un epicentro en el mar y fue registrado por un importante conjunto de instrumentos sismológicos y dispositivos observacionales de la deformación terrestre (instrumentos geodésicos GPS y satelitales InSAR).

### 1. Localización

(100%)

El hipocentro fue re-localizado con los datos de las estaciones del Centro Sismológico Nacional (CNS), el software SeiscomP (GFZ y Gempa, Alemania, versión 2020) y el código de localización Hypo71. SeiscomP es un software de adquisición de datos y procedimiento automático para el cálculo rápido de los parámetros básicos de terremotos (localización, magnitud y tiempo de origen). Posee una interfaz gráfica para analizar, revisar y realizar post-procesamiento de los eventos sísmicos. El nuevo hipocentro está ubicado en la latitud 43.50 W (+/- 5 km), y longitud 74.21 S (+/- 5 km), y profundidad de 25 km, la hora del origen es 14:22:24 (Figura 1). El evento se encuentra al sureste de la Isla Quilán, más cercano al epicentro del CSN que al del USGS.

### 2. Mecanismo focal

(100%)

El tensor de momento se determina con el código Time-Domain Moment Tensor INVerse Code (TDMT\_INV, desarrollado por el Laboratorio Sismológico de Berkeley). El método utiliza datos de forma de onda de banda ancha de baja frecuencia de las estaciones de la Red Sísmica Nacional de Chile a distancias regionales para estimar el tensor de momento de fuente puntual, que se descompone en un momento sísmico escalar y los parámetros de la falla: rumbo, manteo y ángulos de barrido. Además, comparamos esta solución



(Figura 2) con la solución entregada por el programa FNMEAR, desarrollado e implementado dentro del marco del PRS y que se ejecuta de manera automática posterior a la ocurrencia de un evento (<https://prs.dgf.uchile.cl/observatorio-g-data/cmt/>).

### **3. Modelización de la fuente sísmica**

(80%)

#### **3.1. Inversión con datos de movimiento fuerte**

Se ha desarrollado un método simple de la inversión de fuente sísmica con datos de la red de acelerómetros del CSN. El método consiste en invertir algunos parámetros del deslizamiento sobre la falla y hacer una interpolación de estos para tener una fuente sísmica más elaborada. El resultado de la inversión es mostrado en la figura 3.

#### **3.3. Inversión con datos de INSAR**

Dentro de la metodología también es posible obtener una solución para los deslizamientos finales en la falla utilizando los datos INSAR. La Figura 4 y Figura 5 corresponden a la solución obtenida.

#### **3.4. Inversión conjunta**

Finalmente se realiza la inversión conjunta de la fuente con todos los datos. Los parámetros de la fuente se determinan a partir de datos banda ancha telesísmicos, movimientos fuertes, GPS, GPS continuos, InSAR y datos de mareógrafos. La integración de todas las observaciones produce una mejor comprensión de la resolución y las incertidumbres de los modelos de fuentes de terremotos. Los datos sísmicos son esenciales para resolver los cambios temporales del deslizamiento en la falla. Los registros de movimiento fuerte son especialmente importantes para obtener una imagen precisa de la propagación de la ruptura en terremotos grandes. La distribución del deslizamiento final de un terremoto se puede estimar utilizando únicamente datos geodésicos. Los datos geodésicos se pueden combinar con datos sísmicos para una mejor determinación del momento total. Los registros de mareógrafos dan información sobre el comportamiento de baja frecuencia del deslizamiento de la falla, también se utilizan para restringir las distribuciones de deslizamiento.

Incorporar datos de diferentes tipos no es una tarea trivial. Se ha desarrollado una metodología para determinar el peso de cada dato y también la manera de suavizar el modelo de deslizamiento. Se ha realizado también un estudio de las resoluciones de los datos (checkerboard test).

El resultado de la inversión conjunta (Figura 6) muestra una fuente sísmica que se ubica en la parte más profunda de la interfaz del contacto sismogénico y una nueva distribución de deslizamiento para el terremoto de Chiloé. Las figuras de las comparaciones entre los datos y los modelos se exponen en las figuras 2 y 3 de la Línea Tsunami

#### 4. Observaciones y futuros avances:

Una publicación está en desarrollo. Proyectamos la aplicación de este método global a otro terremoto y desarrollar una automatización del proceso.

**Figuras:**

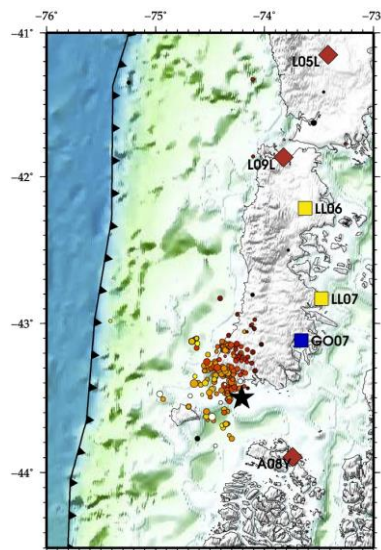


Figure 1: Localización del evento (estrella), réplicas (círculos) de Lange et al. 2017, y estaciones multi-paramétricas del CSN más cercanas

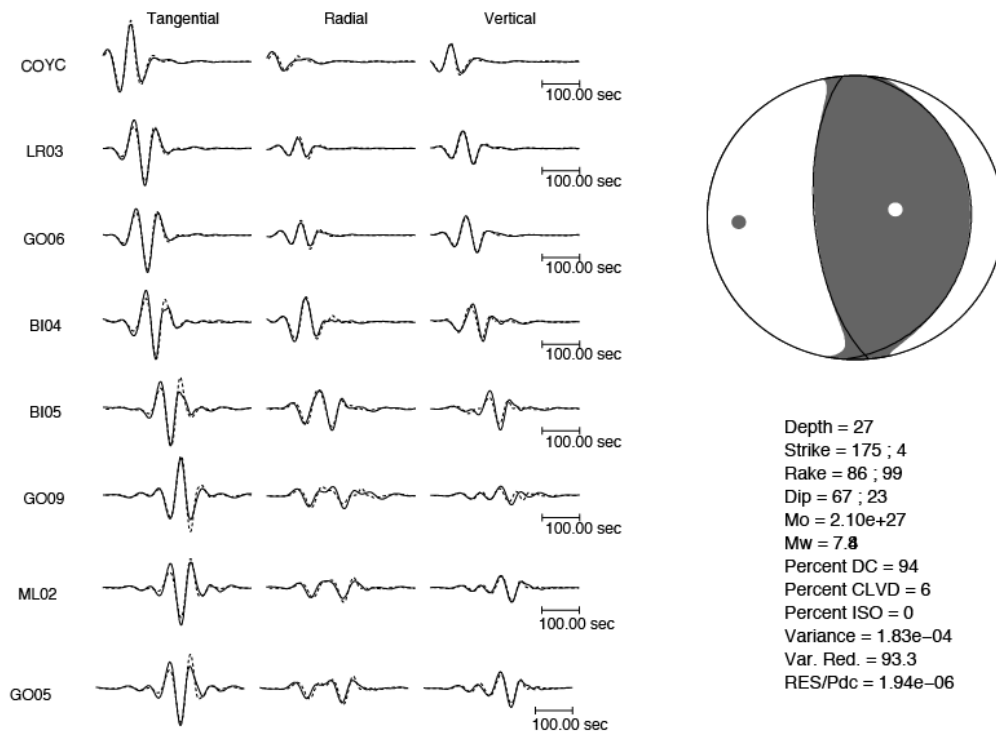


Figura 2: Focal mecanismo

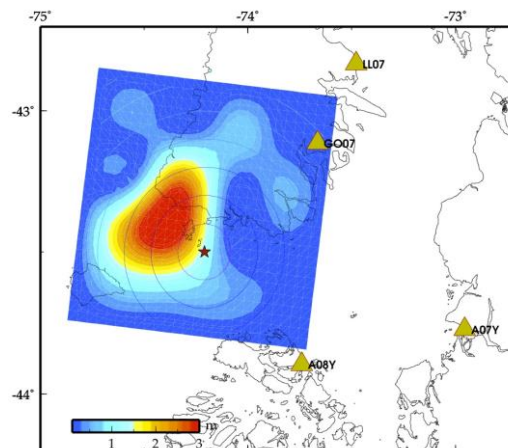


Figura 3: Deslizamiento, resultados de la inversión de movimientos fuertes

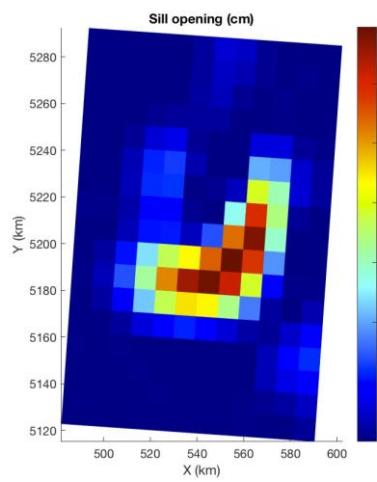


Figura 4: Deslizamiento, resultados de la inversión de INSAR

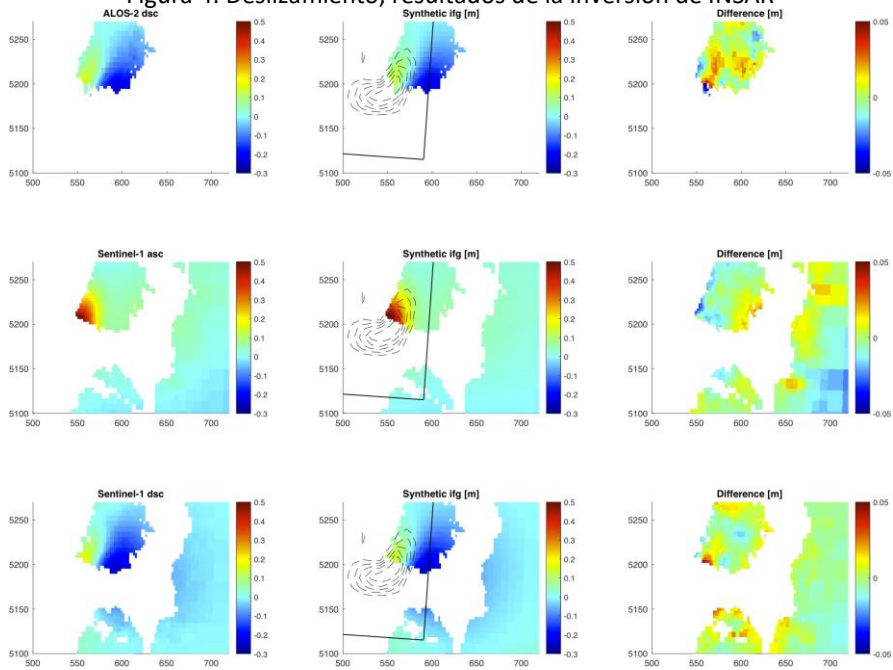


Figura 5: Datos INSAR, sintéticos, residuales

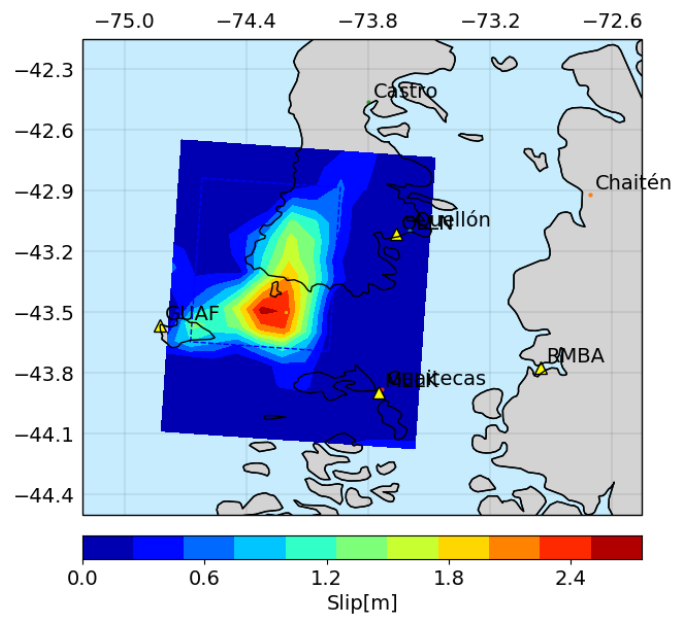


Figura 6: Resultado de la inversión conjunta, Deslizamiento sobre la falla

## V. LÍNEA ESTUDIOS DE SISMICIDAD

### GNSS EN TIEMPO REAL

**Integrantes Equipo Investigador:** Rodrigo Sánchez, Jaime Campos, Rodrigo Severino

#### 1. Antecedentes

La FCFM de la Universidad de Chile tiene como línea estratégica el desarrollo de capacidades y competencias en tecnologías satelitales para el país. El PRS, asumiendo este desafío, ha tomado el compromiso de contar con un polo científico-tecnológico de desarrollando satelital orientado al análisis y explotación científica de los datos e imágenes satelitales focalizado a temas de geoamenazas y riesgo sísmico. Durante el año 2020 se implementó una línea de investigación relacionada a la sismología utilizando los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS). Una de las motivaciones para desarrollar esta línea, reside en la dificultad que existe, con los instrumentos sísmicos tradicionales de la sismología, de medir grandes desplazamientos asociado a terremotos importantes ( $M > 7$ ) debido a la saturación que sufren los instrumentos convencionales (sismómetros de banda ancha) y la complejidad de incluir los instrumentos de registro de la aceleración de partícula por los fenómenos de inclinación y rotación producidos durante los grandes eventos sísmicos. En ésta problemática, el GNSS con altas tasas de muestreo (1Hz, 5Hz, 10Hz, y más), además de medir desplazamientos en forma directa, ha demostrado su capacidad de caracterizar las fuentes sísmicas con resultados muy importantes. Los datos de desplazamiento producidos por los instrumentos GNSS, al carecer de saturación, se vuelven particularmente importantes en el caso de los grandes terremotos y tsunamis que tienen gran impacto en nuestro país.

#### Objetivo

Dentro de esta línea de desarrollo, y producto de un reciente convenio de colaboración firmado con la Universidad de Wuhan (China), se pretende desarrollar la línea de GNSS en tiempo real que permita la caracterización rápida de terremotos utilizando técnicas de PPP-AR (Precise Point Positioning Ambiguity Resolution).

## 2. Tareas realizadas

En el transcurso de este año, se instaló un algoritmo desarrollado por la Universidad de Wuhan llamado GseisRT, que es un software que hace PPP-AR, multi-GNSS en tiempo real, tomando como base las estaciones pertenecientes a la Red GNSS de Centro Sismológico Nacional (CSN), de la Universidad de Chile. Para lo anterior, se incrementó el número de estaciones GPS que son servidas a través del Caster NTRIP del CSN y se ha trabajado fuertemente en optimizar todos los flujos de datos que permiten el adecuado desempeño de este algoritmo. En forma paralela, se desarrollaron interfases web que son capaces de desplegar y almacenar en forma continua toda la información generada en tiempo real proveniente de este sistema. Esta información estará disponible en forma cuasi-real para toda la comunidad que requiera esta información.

Debido a las altas exigencias de procesamiento y almacenamiento que estos algoritmos de cálculo requieren, se hizo la adquisición de un servidor de alta gama, que permitirá consolidar toda la información generada, además de todas las interfaces web y los mecanismos de consulta de las bases de datos de desplazamiento en tiempo real, para los posteriores estudios de caracterización de terremotos.

A su vez, al alero de esta línea de desarrollo, se ha estado capacitando a un conjunto de alumnos en el procesamiento de datos de GNSS, actividad que nos permitirá generar una base de datos de datos GNSS procesados, que nos permitan evaluar el comportamiento de los sistemas en tiempo real.

## 3. Estado de avance

El algoritmo GseisRT está operativo 100% con el grupo actual de estaciones del caster NTRIP del CSN, y se está trabajando fuertemente para aumentar el número de estaciones incorporadas en este caster del CSN, para así poder mejorar la cobertura de estaciones en el territorio nacional. Actualmente solo un 40% de las estaciones se han incorporado al caster de datos GPS del CSN, y se espera llegar al 100% en el transcurso del 2021.



La interfaz web de despliegue de información en tiempo real, esta 100% operativa, y se esta trabajando en las interfaces que permitiran el acceso a esta informacion en tiempo real, para la comunidad que requiera acceder a esta información. El estado de avance de esa interfaz está a al 60% del trabajo proyectado.

Se está trabajando en la instalación del servidor de alta gama definitivo, que permitirá la consolidación de las bases de datos generadas tanto por esta línea de desarrollo como las del resto de líneas del PRS. El estado de avance de esta instalación es de un 30% y se espera completarla en el primer mes del 2021.

#### **4. Observaciones y futuros avances**

Este proyecto comenzó a desarrollarse a fines del Abril del 2020, y debido a las restricciones impuestas por la pandemia en curso, los tiempos de implementación, adquisición, accesos a datacenter, etc. nos han obligado a avanzar a un ritmo más lento.

Para el año 2021, se pretende avanzar en de manera muy importante en la caracterización rápida de eventos sísmicos relevantes, además de consolidar todos los desarrollos realizados a la fecha.

#### **Imágenes**

Se adjunta imágenes provenientes del sistema GseisRT para la estacion GPS CBAA, Cordón Barros Arana:

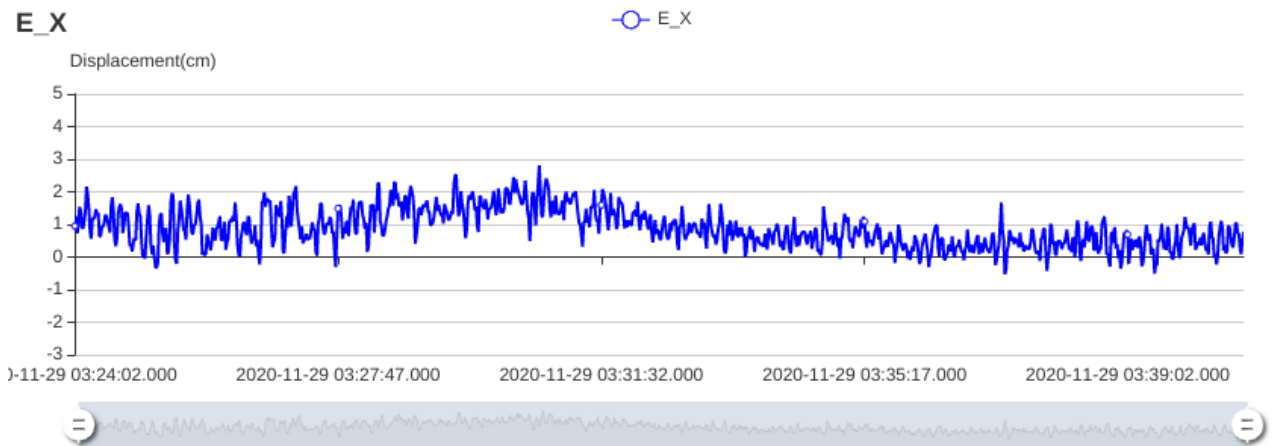
**Estación:**       **CBAA**

**Latitud:**       -22.746394

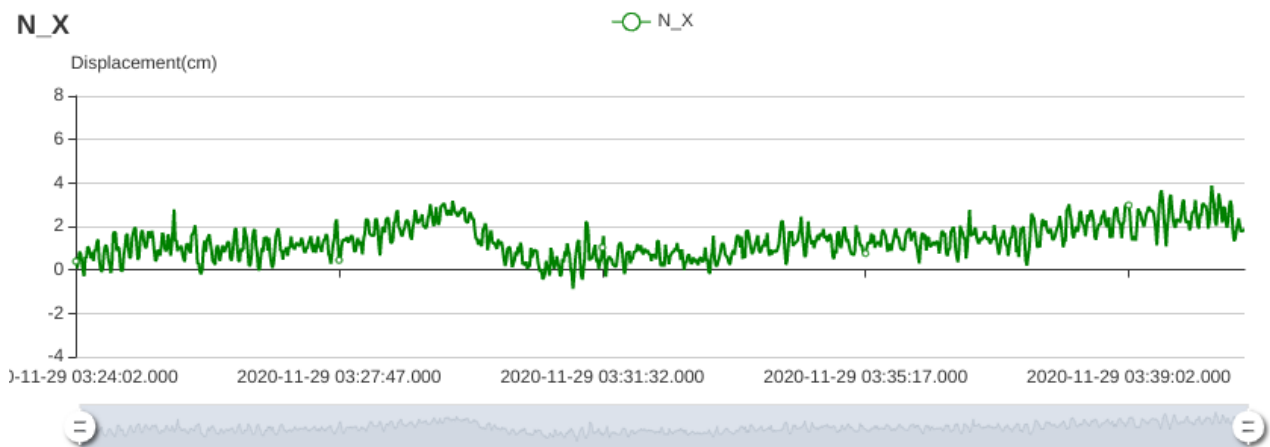
**Longitud:**     -68.448198

## Salidas de GseisRT:

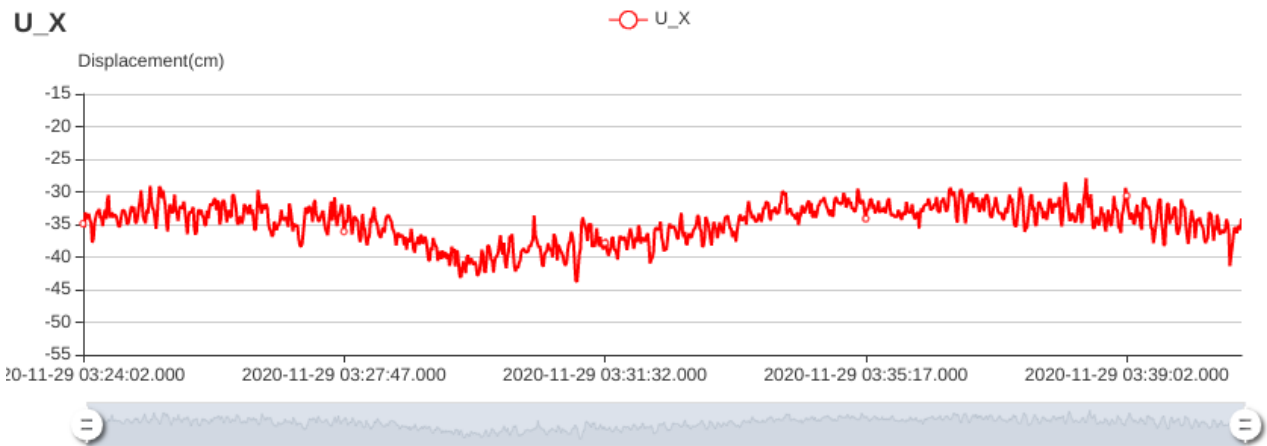
### Componente Este-Oeste:



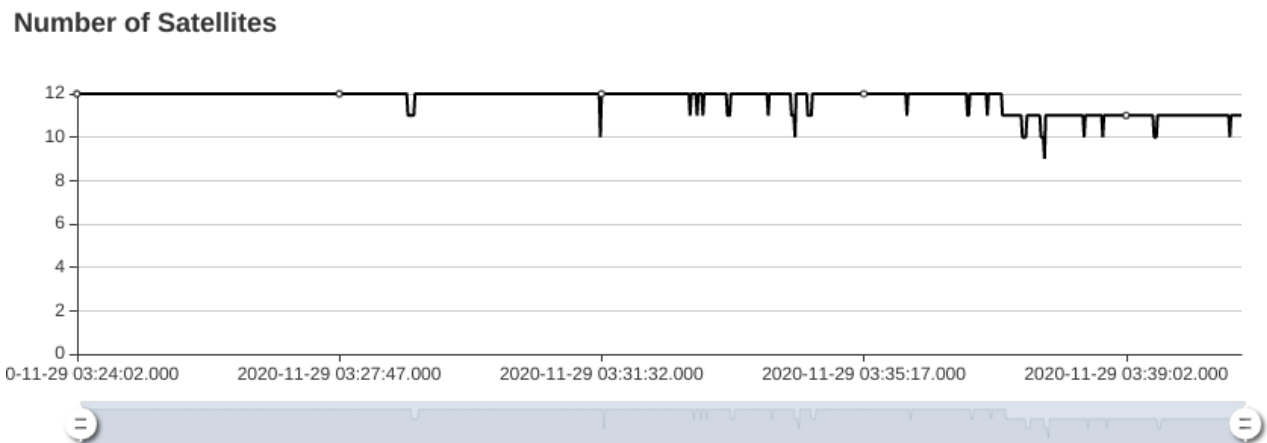
### Componente Norte-Sur:



### Componente Arriba-Abajo:



### Número de Satélites



## Publicaciones del período

Habrá una presentación de GseisRT en el AGU Fall Meeting 2020, el día 17 de Diciembre de 2020, donde hemos sido incluidos como parte de esta presentacion por el trabajo realizado durante este año.

Link:

<https://agu.confex.com/agu/fm20/prelim.cgi/Paper/692962>

The screenshot displays the AGU Fall Meeting 2020 website interface. The top navigation bar includes the AGU logo, the text 'AGU FALL MEETING Online Everywhere | 1-17 December 2020', and links for REGISTER, ONLINE EXPERIENCE, PRESENTER RESOURCES, CHAIR RESOURCES, and FAQ. A left sidebar menu lists various site functions such as Home, Sign In, Search, Submit an Abstract, Index Terms, Co-Organized, Co-Sponsored, Cross-Listed, COVID-19 Itinerary, Meeting Resources, Code of Conduct/Ethics, and Technical Support. The main content area features the paper title 'G026-05 - GSeisRT: A precise point positioning software to capture ground deformations for geohazards in real time using GPS/BeiDou/GLONASS/Galileo/QZSS observations'. Below the title, it specifies the date as Thursday, 17 December 2020, the time as 07:16 - 07:20, and the format as Virtual. An 'Authors' section lists the following individuals and their affiliations: Jianghui Geng (Wuhan University), Shaoming Xin (Wuhan University), Ran Zeng (Wuhan University), Qi Zhang (Wuhan University), David Mencin (UNAVCO, Inc.), Kathleen Marian Hodgkinson (UNAVCO), Tan Wang (China Earthquake Administration), Sebastian Riquelme (University of Chile), and Rodrigo Fernando Sanchez-Olavarria.

## **ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA CORTICAL CHILE CENTRAL, FRENTE CORDILLERANO.**

**Integrantes Equipo Investigador:** Adriana Pérez, Patricio Toledo, Jaime Campos

### **Objetivo**

Identificar el tipo de sismicidad y determinar mecanismos focales de eventos que han ocurrido los últimos años en la zona cordillerana de Chile Central, específicamente la zona cercana a la Región Metropolitana. El sistema tectónico de fallas geológicas en la región cordillerana acomoda la deformación cortical a través de mecanismos que involucran desde los procesos asísmicos, que no generan sismos sensibles y/o detectables con los sismómetros convencionales (creep y deformación dúctil en profundidad), hasta los asociados a deformación frágil o sísmicos a lo largo de fallas geológicas en la corteza.

### **1. Antecedentes**

En los últimos 3 años la Universidad de Chile, a través de su Centro Sismológico Nacional (CSN), ha instalado un mayor número de instrumentos sismológicos en la zona cordillerana de la Región Metropolitana que ha permitido mejorar las capacidades observacionales y de detección, cubriendo mejor el área y la sensibilidad de los equipos para detectar procesos de deformación lenta (equipos GNSS) a eventos sísmicos de baja magnitud o microsismos asociados a fallas geológicas, varias de ellas ya identificadas (equipos BRB).

En el marco del Programa de Riesgo Sísmico (PRS), se consideró de mayor importancia llevar a cabo una investigación enfocada al estudio de detalle de la actividad sísmica cortical detectada con estos nuevos equipos en la zona de Chile Central (Santiago), específicamente en su frente cordillerano. Esto contribuirá a identificar y localizar las fallas geológicas potencialmente activas con datos e información clave para futuras evaluaciones de la amenaza sísmica de la región.

La zona de estudio se caracteriza por estar conformada por un Orógeno Andino de vergencia principal oeste con evidencias de importantes estructuras tectónicas activas, que inciden notablemente en la amenaza sísmica de la ciudad de Santiago, la cual se emplaza en la denominada depresión central o cuenca de Santiago, ubicada en frente de importantes fallas activas asociadas al primer Frente Occidental del Orógeno Andino. Destaca en éste, el sistema de fallas San Ramón cuya expresión morfológica más evidente consiste en una serie de escarpes de falla de tipo thrust-slip (inversa). La falla San Ramón, que corta depósitos sedimentarios de edades Pleistoceno y Holoceno a lo largo del borde este de Santiago, entre el río Mapocho y el río Maipo, constituye un objeto de primer orden de amenaza sísmica, con deslizamientos métricos a lo largo de varios kilómetros.

Esta estructura ha sido identificada como el mecanismo de rampa principal de despegue para explicar el alzamiento del frente cordillerano. Más al este, se define un segundo frente del Orógeno caracterizado por un segundo escalón topográfico más alto, responsable de las altas cumbres donde se concentran importantes estructuras como las fallas de Olivares, Laguna Negra, Chacayes-Yesillo

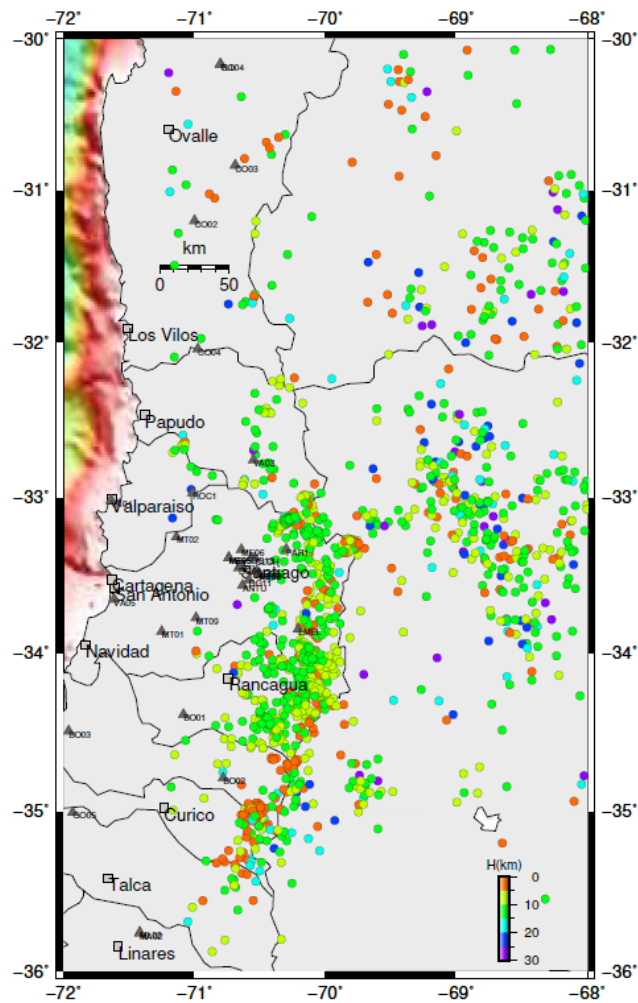
Diversos estudios han sido realizados en la Falla San Ramon, entre ellos: Armijo et al., 2010; Farias et al., 2011; Rauld., 2011; Pérez et al., 2014; Estay et al., 2016 entre otros, así como el proyecto Monitoreo sísmico y potencial sismogénico de la Falla San Ramón (ONEMI – CSN - FCFM) llevado a cabo entre los años 2016 – 2019. Todos ellos han permitido obtener una caracterización detallada de la falla, tanto desde el punto de vista geológico como sismológico, así como la determinación de su potencial peligro sísmico y el rango de magnitudes probables de ocurrencia con el PGA asociado.

No es objetivo de este informe entrar en los detalles de los estudios mencionados anteriormente.

En esta oportunidad nuestro objetivo ha estado centrado en obtener una actualización de la base de datos de la actividad sísmica asociada a la sismicidad cortical del frente cordillerano, así como en la obtención de los tensores de momento sísmicos asociados a eventos de magnitudes superiores a 4.0. Para ello se ha empleado la metodología propuesta por Dreger, 1993 la cual será descrita en el presente documento.

En la Figura 1 se presenta como contexto general la distribución espacial de la actividad sísmica cortical (0 – 30 km) histórica ( $M < 3.5$ ) ocurrida en Chile Central entre los años 1990 – 2020. Es posible observar como la mayor actividad se encuentra localizada entre

los 33° S a los 35° S y los 70°W - 71° W en torno a la cordillera principal entre Santiago y Curicó, hacia el norte de los 33°S se observa una drástica disminución en la actividad sísmica. Hacia el lado argentino (Cordillera frontal) una mayor dispersión en la actividad sísmica entre los 31°S – 35° S es observada.

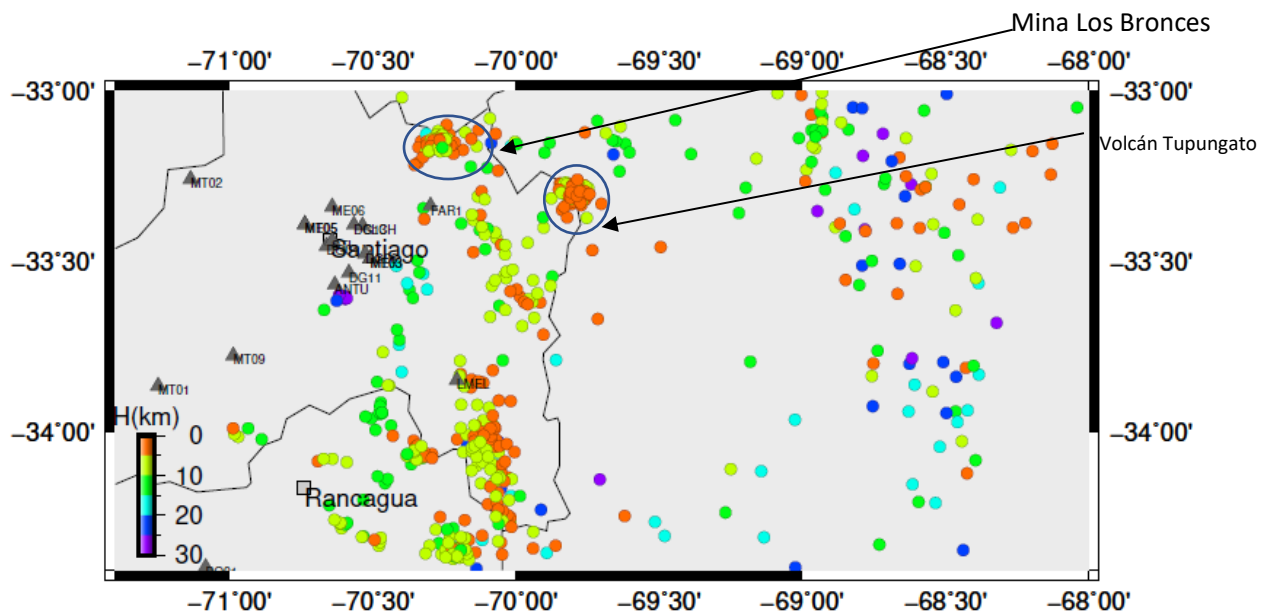


**Figura 1.** Actividad sísmica 1990 - 2020, el color asociado indica la profundidad de los eventos según la escala.

Para la confección de la base de datos de la zona específica a estudiar, se tomó la actividad sísmica localizada entre los -33°S - 34.5°S y los -71.2°W - 68°W entre los años 2000 y 2020 ( $M < 3.5$  y Z entre 0 – 30 km). Un total de 396 sismos fueron



obtenidos (Figura 2), de los cuales a aquellos de magnitud  $> 4.0$  se les realizó la inversión del tensor de momento sísmico mediante el uso de la metodología de Dreger (1993).



**Figura 2.** Actividad sísmica 1990 – 2020 ( $M < 3.5$ ,  $Z 0 - 30$  km) el color asociado indica la profundidad de los eventos según la escala.

## 2. Metodología

### 2.1 Teoría aplicada para la Inversión del Tensor de Momento Sísmico (Dreger, 1993).

El método de inversión utilizado para la inversión del tensor de momento sísmico (Dreger, 1993) se basa en invertir el sismograma completo bajo la suposición de una fuente puntual.

$$U_n(\mathbf{x},t) = M_{ij} * G_{ni,j}(\mathbf{x},\underline{z},t)$$

El campo de desplazamientos registrado en una estación sísmica en la componente  $n$ -ésima  $U_n(\mathbf{x},t)$ , producto de las ondas generadas por un sismo puede ser representado mediante una convolución entre el tensor de momento sísmico,  $M_{ij}$ , el cual varía con el tiempo, y la derivada de la función de Green,  $G_{ni,j}(\mathbf{x},\underline{z},t)$ .

La descomposición del tensor de momento tiene en cuenta solo la componente Deviatorica del tensor de momento sísmico, es decir se considera nula la parte isotrópica del tensor de momento, lo que a su vez supone nulos los cambios de volumen en la región de la fuente (Jost y Herrmann, 1989).

El problema se resuelve usando funciones de Green precalculadas a varias profundidades del foco o hipocentro eligiendo finalmente aquella profundidad en la que el ajuste entre los sismogramas observados y los sintéticos es el mejor. Se aplica un filtro pasabanda tanto a las formas de onda sintéticas como observadas. Una buena forma de cuantificar la bondad del ajuste resultante del proceso de inversión es mediante el parámetro definido como reducción de la varianza o varianza reducida.

$$RV = \left[ 1 - \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(d_i - D_i)^2}{d_i^2}} \right] * 100.$$

Donde  $n$  es el número de muestras,  $d_i$ , es el sismograma observado convertido a unidades de desplazamiento y  $D_i$  es el sismograma sintético en desplazamiento. En este caso se retiene como mejor solución aquella que entrega la máxima reducción de varianza. El valor así obtenido para la reducción de la varianza para cada estación/componente es un índice de la calidad del ajuste. El valor de reducción de la varianza total es el promedio

de los valores de este parámetro para todas las componentes de las estaciones utilizadas para invertir el tensor de momento.

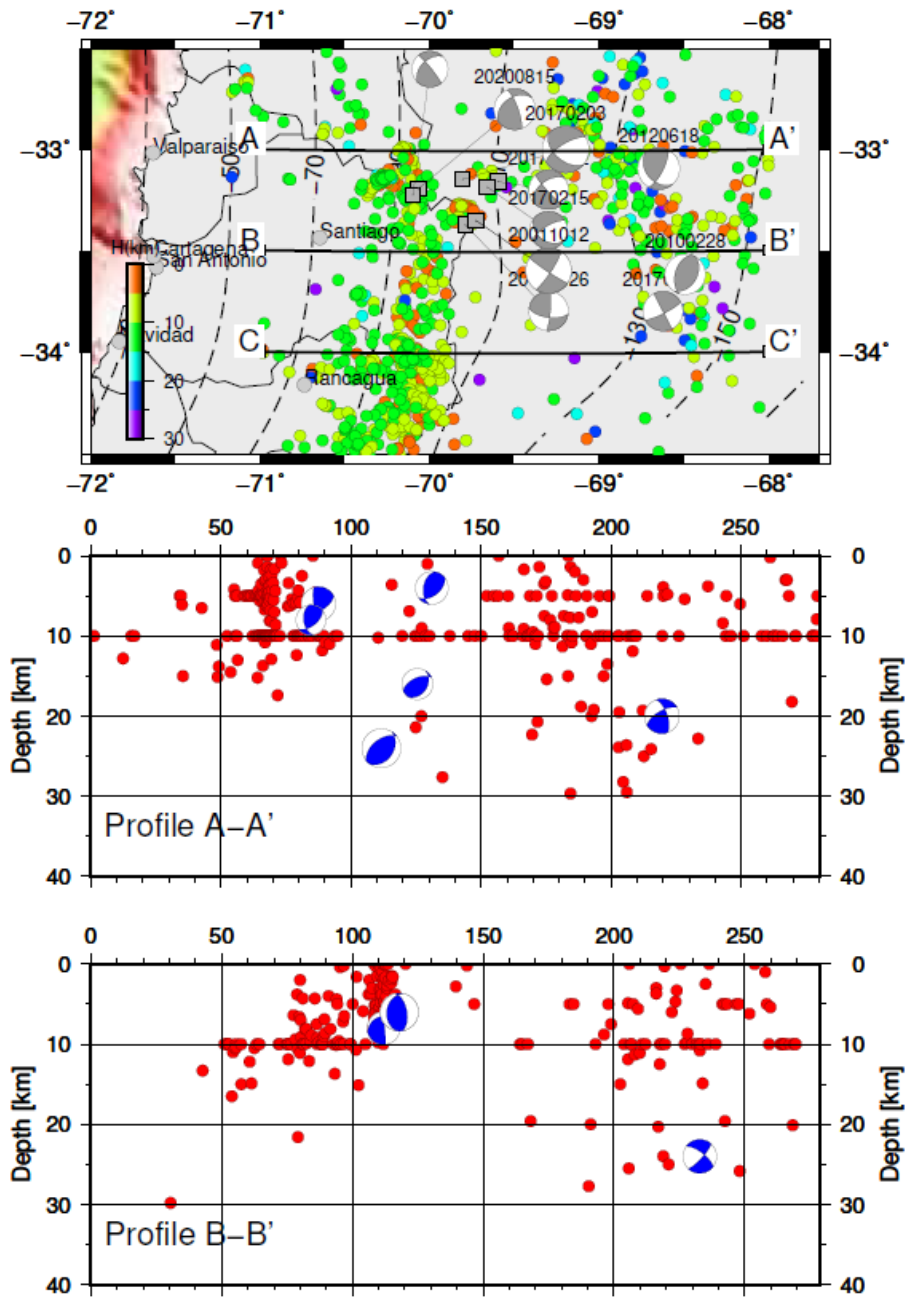
### 3. Resultados

#### 3.1 Tensor de Momento Sísmico.

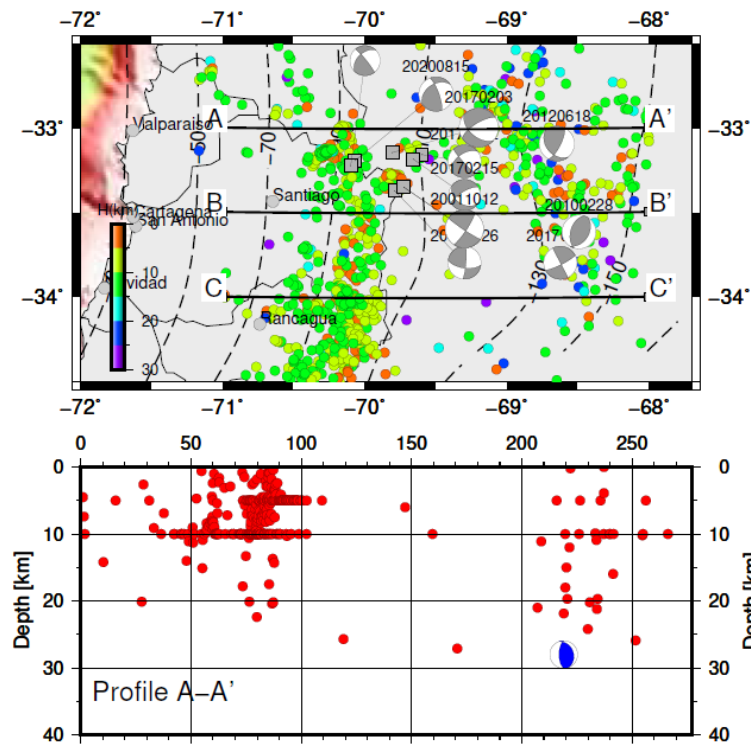
En la tabla 1 se presenta un resumen de los 30 eventos de magnitud superior a 4.0 que fueron analizados y modelados mediante el uso de la metodología de Dreger (1993), del total de ellos 10 fueron posibles de modelar a fin de obtener su tensor de momento sísmico, los restantes 20 no fue posible debido a la mala calidad de las formas de onda. (Figuras 3 y 4).

Time	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud	Modelamiento
2020-08-17T03:28:13	-33,226	-70,101	10	4.1	Dreger (8)
2020-08-15T11:11:58.467Z	-33,223	-70,159	10	4.8	Dreger (6)
2018-10-26T01:59:02	-33,375	-69,791	9.3	4.5	Dreger (8)
2018-06-16T11:35:24.820Z	-33,993	-70,492	10	4.9	NO
2018-05-23T23:21:14	-33,359	-69,222	10	4.2	NO
2017-11-12T01:31:31	-33,167	-69,600	10	4.5	Dreger (4)
2017-11-01T22:26:51	-33,181	-69,604	10	4.1	NO
2017-02-24T16:00:43	-33,192	-69,667	10	4.3	NO
2017-02-15T15:51:50.160Z	-33,187	-69,661	22	4.7	Dreger (16)
2017-02-13T08:27:52.790Z	-33.145,000	-69,663	10	4.5	Sin formas de onda
2017-02-04T19:25:14	-33,105	-69,636	9	4.1	NO
2017-02-03T00:52:26.450Z	-33,088	-69,716	10	5.4	Dreger (24)
2017-01-21T09:30:38.640Z	-33,800	-68,626	21,8	4.5	Dreger (28)
2015-09-14T13:38:53.150Z	-33,310	-68,641	23.9	4.5	NO
2015-08-31T03:14:05	-33,059	-69,455	2	4.1	NO
2012-06-18T08:29:04.440Z	-33.009	-68.496	22.8	5.3	Dreger (20)
2011-07-06T14:34:13.250Z	-33.051	-68.791	23.6	4.6	NO
2010-03-13T16:33:16.420Z	-34.137	-69.708	25.7	4.9	Sin formas de onda
2010-02-28T08:15:05.140Z	-33.565	-68.385	19.6	4.9	Dreger (24)
2009-10-25T21:36:05.900Z	-34.034	-70.171	20.1	4.5	NO
2007-03-23T19:26:48.400Z	-34.163	-70.054	20.2	4.6	NO
2006-08-05T14:03:44.230Z	-33.126	-68.719	25	5.6	NO
2006-01-08T05:22:33.540Z	-33.795	-68.508	24.2	4.7	NO
2004-12-17T19:11:09.380Z	-33.407	-68.782	25.5	4.5	NO
2004-09-29T14:50:31.500Z	-33.38	-70.132	9.1	4.5	NO
2004-09-29T11:25:05.710Z	-33.39	-70.192	10	4.6	NO
2004-09-12T14:24:37.030Z	-34.136	-70.015	5	5.4	NO
2001-10-12T04:33:00.300Z	-33.332	-69.702	0	4.7	Sin formas de onda
2001-10-12T04:21:31.500Z	-33.303	-69.744	3.8	5.3	Dreger (6)
2001-06-26T03:44:46.140Z	-33.791	-70.196	5	4.6	Sin formas de onda

Tabla 1. Eventos Sísmicos modelados mediante la metodología de Dreger, 1993.



**Figura 3.** Soluciones de tensores de momento sísmicos (Dreger, 1993) obtenidas en este estudio. Perfiles AA, BB.

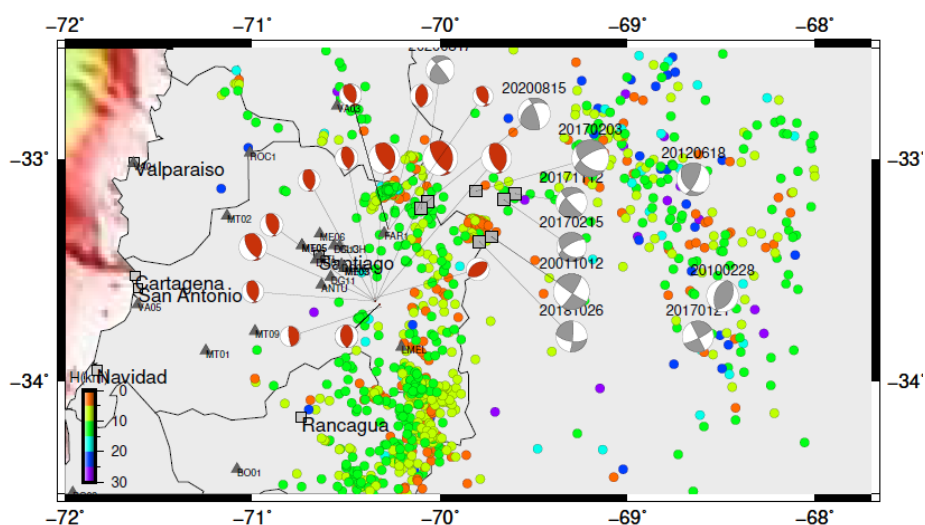


**Figura 4.** Soluciones de tensores de momento sísmicos (Dreger, 1993) obtenidas en este estudio. Perfil CC.

Los eventos analizados se encuentran 4 de ellos en el sector de la cordillera principal, dos cerca de la zona del Volcán Tupungato y dos cerca de estación Farellones, 3 eventos se encuentran ubicados en la cordillera frontal cerca de la frontera Chile - Argentina hacia el NE del volcán Tupungato. Los restantes 3 eventos se encuentran ubicados al interior de Mendoza. (Tabla 1 y Figuras 3 y 4).

Los eventos ubicados en la Cordillera Principal presentan profundidades muy superficiales entre los 6 y 8 km (celeste en tabla 1), las profundidades de los eventos restantes son más variables entre 15 y 25 km (Cordillera frontal), estas observaciones están en concordancia con los resultados obtenidos por Ammirati et al, 2019, quienes realizaron un estudio detallado de la actividad sísmica cortical, la cual se encontró principalmente distribuida hacia el lado este de la cordillera principal con profundidades entre 5 y 15 km y hacia el lado occidental con profundidades entre 10 y 20 km.

En la figura 5 se presentan los tensores de momento sísmicos obtenidos en este estudio y aquellos obtenidos por Pérez et al, 2014 en la misma zona de estudio, el cual evidencio la actividad de la Falla San Ramon mediante un análisis exhaustivo de la actividad sísmica de la zona, así como la interacción de esta en la tectónica andina del frente cordillerano frente a Santiago.



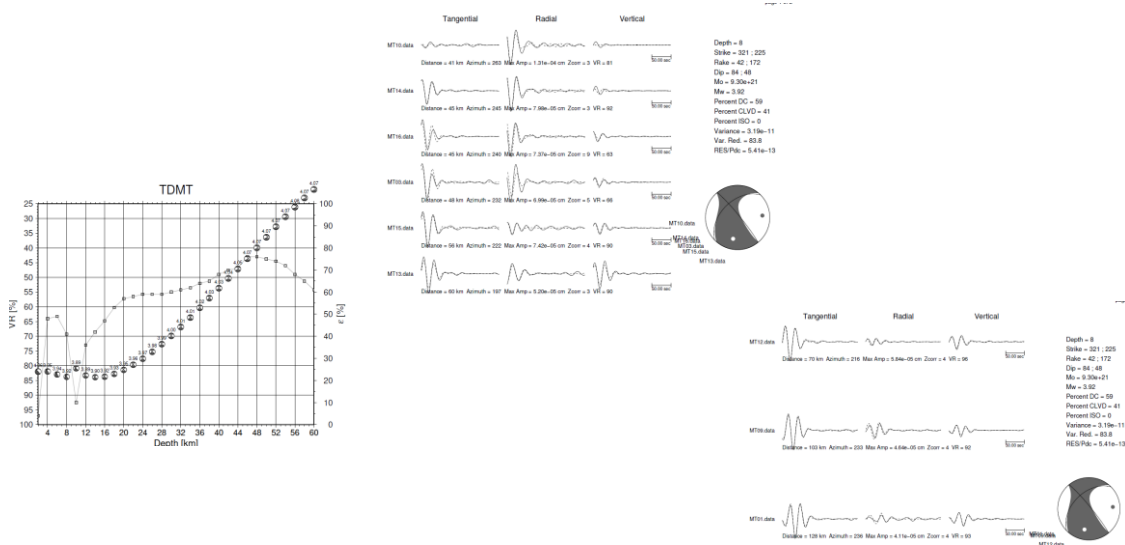
**Figura 5.** Soluciones de tensores de momento sísmicos (Dreger, 1993) obtenidas en este estudio (gris) y soluciones de tensores obtenidos en estudio de Pérez et al, 2014 (rojo).

### 3.2 Resultados de TDMT (Dreger, 1993).

A continuación, se presentan los modelamientos de los tensores obtenidos para cada uno de los eventos descritos anteriormente.

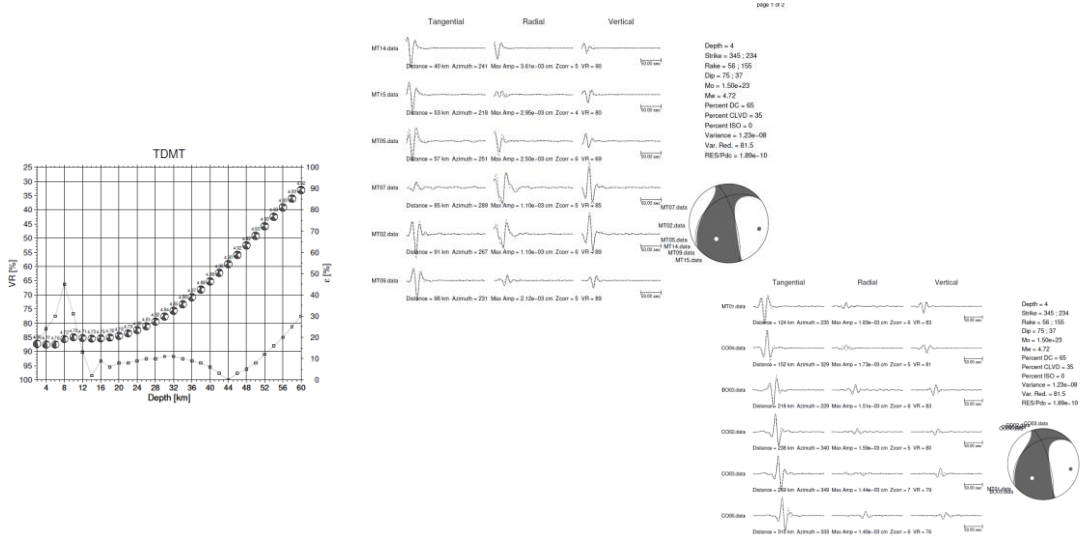
Las figuras muestran el ajuste de las formas de onda sintéticas y observadas para cada uno de los eventos, de las componentes tangencial radial y vertical. Las variables producto de la inversión son la geometría de los planos nodales (strike, dip rake), el momento sísmico, la magnitud  $M_w$ , el porcentaje de la parte isotrópica (ISO), doble cupla (DC) y dipolo vectorial lineal compensado (CLVD), resultantes. La variable que representa la bondad del ajuste del proceso de inversión es la varianza reducida cuyo valor varía entre 0 y 100%. El cero representa una inversión de mala calidad y el 100% representa la mejor calidad de la inversión.

#### Dreger: Evento 2020-08-17-03h28 Mw 4.1 Datos IRIS.

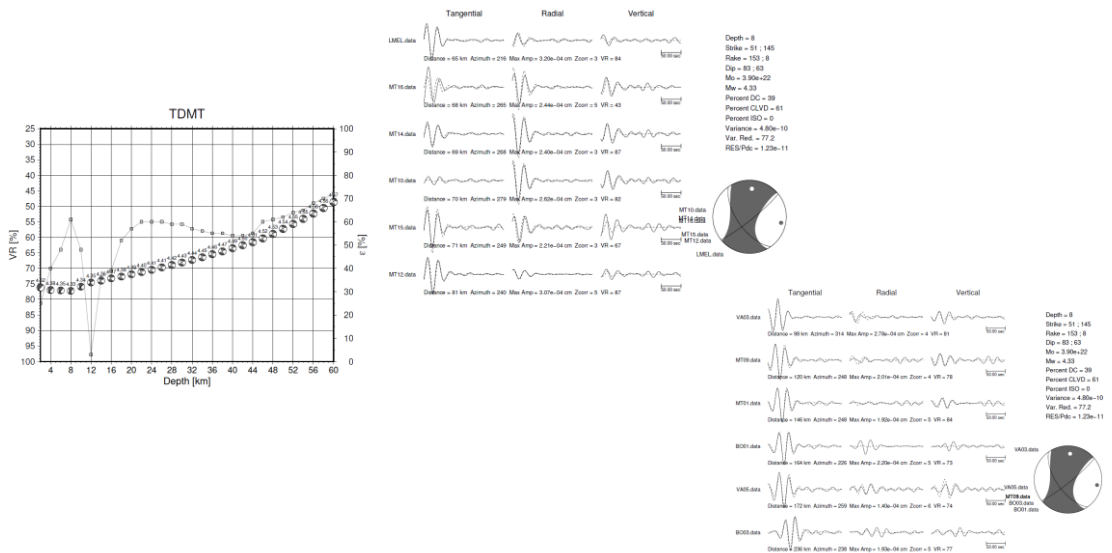




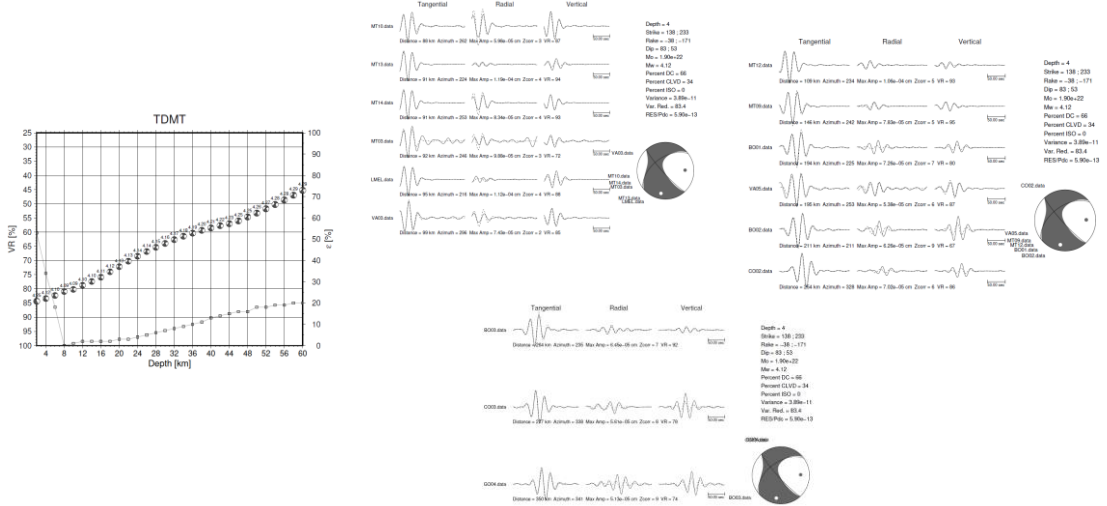
# Dreger: Evento 2020-08-15-11h11 Mw 4.8. Datos IRIS



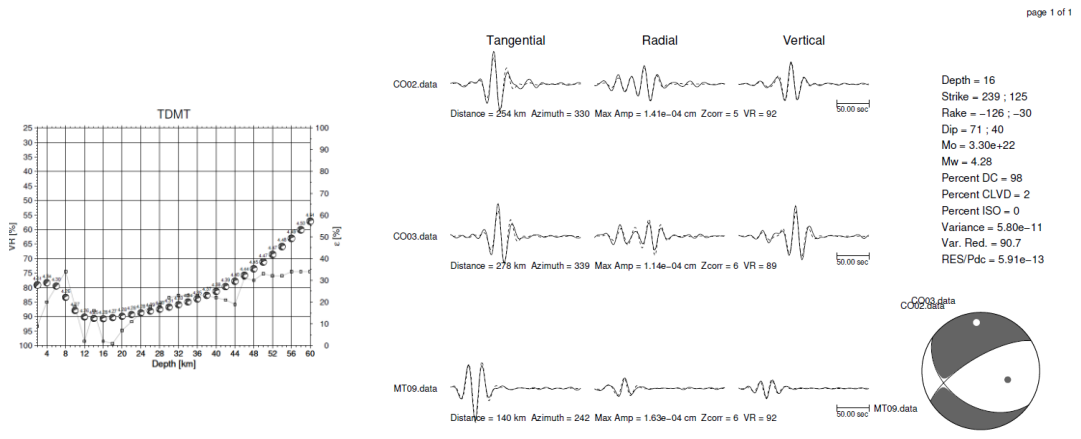
# Dreger: Evento 2018-10-26-01h59 Mw 4.5



# Dreger: Evento 2017-11-12-01h31 Mw 4.5



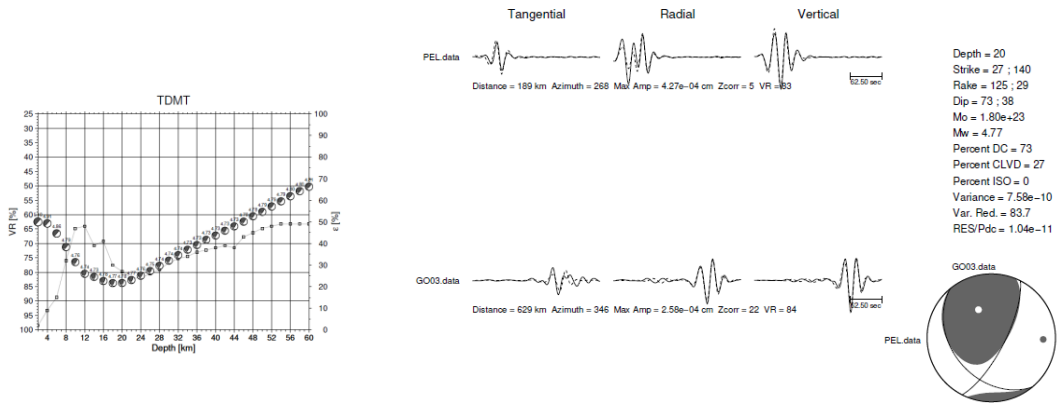
# Dreger: Evento 2017-02-15-15h51 Mw 4.7



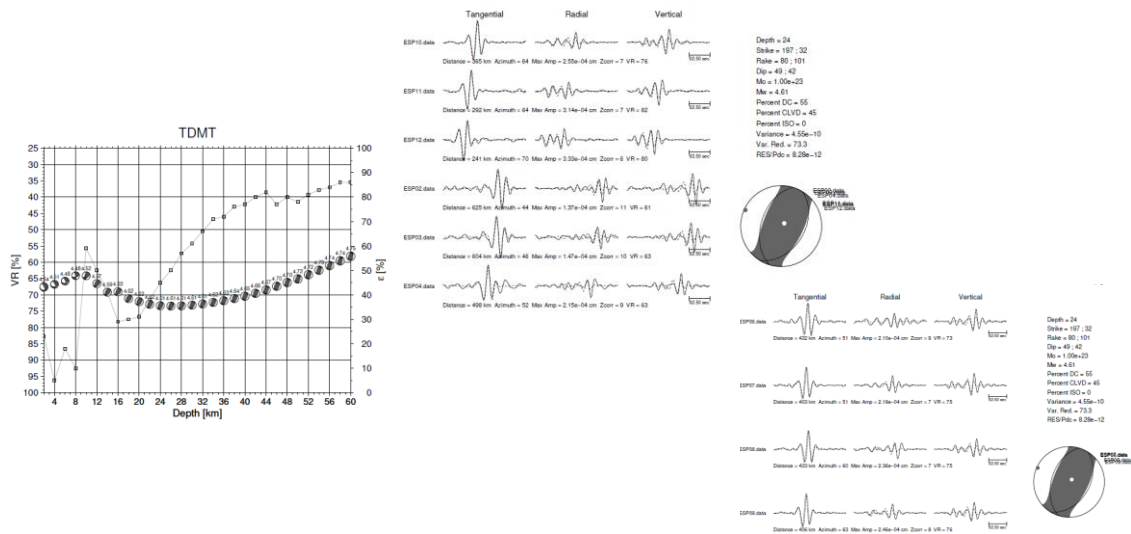
page 1 of 1



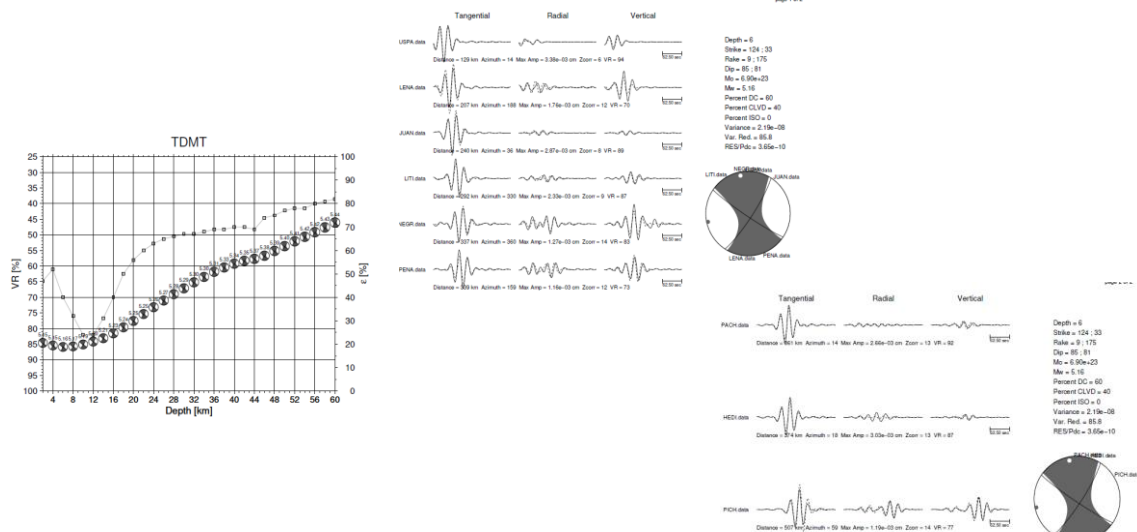
# Dreger: Evento 2012-06-18-08h29 Mw 5.3



# Dreger: Evento 2010-02-28-08h15 Mw 4.9



# Dreger: Evento 2001-10-12-04h21 Mw 5.3



## Bibliografía

Ammirati, J. B., Vargas, G., Rebolledo, S., Abrahami, R., Potin, B., Leyton, F., Ruiz, S. The Crustal Seismicity of the Western Andean Thrust (Central Chile, 33°–34° S): Implications for Regional Tectonics and Seismic Hazard in the Santiago Area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 109, No. 5, pp. 1985–1999, October 2019, doi: 10.1785/0120190082

Armijo, R., Rauld, R., Thiele, G., Vargas, J., Campos, R., Lacassin, and E. Kausel (2010). The west Andean thrust, the San Ramón fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile, *Tectonics* 29, TC2007, doi: 10.1029/2008TC002427

Dreger, D., y Helmberger V., (1993): Determination of source parameters at regional distances with three-component sparse network data. *Journal of Geophysical Research*, 98: 8107-8125.

Estay, N. P., G. Yáñez, S. Carretier, E. Lira, and J. Maringue (2016). Seismic hazard in low slip rate crustal faults, estimating the characteristic event and the most hazardous zone: Study case San Ramón fault, in Southern Andes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 2511–2528, doi: 10.5194/nhess-16-2511-2016

Farías, M., D. Comte, R. Charrier, J. Martinod, C. David, A. Tassara, F. Tapia, and A. Fock (2010). Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building, *Tectonics* 29, doi: 10.1029/2009TC002480.

Pérez, A., J. A. Ruiz, G. Vargas, R. Rauld, S. Rebolledo, and J. Campos (2014). Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramón Fault at the eastern border of Santiago city, Chile, *Nat. Hazards* 71, no. 1, 243–274, doi: 10.1007/s11069-013-0908-3.

## VI. LÍNEA INVESTIGACIÓN PATRIMONIO

**Integrantes equipo investigador:** Jaime Campos, Daniela Díaz, Guillermo González, Juliette Marin Ríos, Sandra Rojas Barlaro

### Objetivos

La línea de investigación Patrimonio y riesgo sísmico se inicia en 2018 con el objetivo de proponer metodologías para estimar la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras patrimoniales adaptadas al contexto Andino y a los territorios chilenos. Se llevaron adelante estudios a escala territorial de iglesias patrimoniales en adobe en Valparaíso y Tarapacá, contribuyendo en la formación de estudiantes de ingeniería civil y desarrollando intercambios y colaboraciones con universidades italianas e instituciones públicas chilenas generando así vínculos inéditos en Chile.

### 1. Tareas realizadas

Para la conmemoración de los 50 años del terremoto de Valdivia (1960), se organizó una reflexión multidisciplinaria sobre los impactos del terremoto, en coordinación con la línea de Tsunami del PRS e investigadore/as de la Facultad de Ciencias Sociales (FACSO) de la U. de Chile. Este trabajo fue publicado en diversos medios de prensa, entre los cuales [diarios nacionales](#) y [noticieros televisivos nacionales](#). También se publicó [la columna “A 60 años del terremoto de Valdivia: Los misterios que los sismólogos siguen tratando de descifrar”](#). Finalmente, se organizó junto con el Consejo de Monumentos Nacionales y al medio “La Voz de Maipú” un conversatorio público cuyo título fue “A 60 años del megaterremoto de Valdivia: Tres miradas al evento sísmico de mayor magnitud registrado en el mundo”, a través de la plataforma Facebook Live del PRS. El video de la actividad ha tenido 2,6 mil reproducciones.

El 17/6/2020, se publicó la [columna “Los terremotos también son nuestro patrimonio: las huellas sísmicas de Santiago”](#) para la conmemoración del Día del Patrimonio Cultural.

El 8/7/2020, se conmemoró el terremoto de La Ligua de 1971 impulsando una reflexión multidisciplinaria con la Línea Teoría del Riesgo del PRS e investigadore/as del Instituto de la Vivienda (INVI) y de la Facultad de Filosofía y Humanidades de la U. de Chile.



Se organizó y realizó el conversatorio online “A 25 años del terremoto magnitud 8.1 en Antofagasta, Memoria y resiliencia”, en conjunto con el Consejo de Monumentos Nacionales (CMN) y la Universidad Católica del Norte (UCN), el 30/7/2020. La transmisión se hizo a través del [canal YouTube del CMN](#) .

En agosto 2020, Guillermo Gonzalez entregó su memoria de título “EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL PATRIMONIO CULTURAL CHILENO: ESTUDIO DE IGLESIAS PATRIMONIALES DE VALPARAÍSO”. Este trabajo deberá ser defendido durante el segundo semestre 2020.

En noviembre 2020, se participó en el Festival de la ciencia (FECI), organizado por el Par Explora Sur Poniente, el mediante un [podcast transmitido online](#) y en la Radio Universidad de Chile.

## **2. Estado de avance (%)**

Artículo sobre investigación de vulnerabilidad sísmica de iglesias en adobe de la quebrada de Tarapacá. 75%

Trabajo sobre vulnerabilidad sísmica de iglesias patrimoniales de Valparaíso. 95%

Coordinación multi e interdisciplinaria, difusión, extensión. 100%

## **3. Observaciones y futuros avances**

A continuación, se espera publicar algunos de los aprendizajes y seguir avanzando los estudios con otros tipos de estructuras. Además se espera potenciar las miradas multi e interdisciplinarias, en particular con investigadores/as de la U. de Chile e instituciones públicas relevantes en la temática.

#### 4. Imágenes

**A 60 años  
DEL MEGATERREMOTO DE VALDIVIA**  
Tres miradas al evento sísmico de mayor magnitud registrado en el mundo

**f LIVE**  
Modera: Juliette Marin  
**Miércoles 27**  
mayo 2020  
De 19:30 a 20:30

<https://www.facebook.com/ParExploraSP>  
[www.facebook.com/PRSismo](https://www.facebook.com/PRSismo)

**Jaime Campos**  
Director del PRS  
Geofísico, Universidad de Chile (USC) y Doctor en Geofísica, Université Paris Diderot

**Daniela Diaz**  
Doctora en Arquitectura, encargada área patrimonio en Pisco, Consejo de Monumentos Nacionales

**Mauricio Fuentes**  
Ingeniero Civil Matemático y Geofísico, Universidad de Chile (PUC)

2020  
**1000 CIENTIFICAS 1000 AULAS**  
en casa

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación  
**explora**  
GOBIERNO DE CHILE

**PAREXPLORA RMSURPONIENTE**  
PROYECTO ASOCIATIVO REGIONAL

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**PRS**  
Proyecto Regional Surponiente

**CMN**  
CONSEJO NACIONAL DE MONUMENTOS NACIONALES

**LVDM**  
LABORATORIO DE VALDIVIA

**EFEMÉRIDE**

**TERREMOTO de ILLAPEL**  
8 de Julio de 1971 - 7,8 Mw

- El evento se produjo a las 23:04, hora local.
- Aunque el epicentro ocurrió en La Ligua, la ciudad de Illapel vivió daños devastadores, motivo por el que el terremoto lleva su nombre.
- Ese mismo día se cumplían 241 años del megaterremoto de Valparaíso de 1730.

Illapel  
Epicentro, La Ligua  
Hipocentro, 40 km de profundidad

**85** muertes †  
**451** heridas/os 👤  
**284.000** damnificadas/os 🏠

**PRS**



## 5. Publicaciones del período

Publicaciones en prensa y medios masivos y/o abiertos de comunicación:

<https://www.uchile.cl/noticias/163643/los-moais-que-derrumbo-el-tsunami-del-terremoto-de-valdivia>

<https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/asi-fue-el-tsunami-que-genero-el-terremoto-de-valdivia-cientificos-recrean-computacionalmente-maremoto-que-golpeo-ista-de-pascua/NIKRTTWKZNF5JMEYBGFCZIK3Q/>

<https://prs.dgf.uchile.cl/a-60-anos-del-terremoto-de-valdivia-los-misterios-que-los-sismologos-siguen-tratando-de-descifrar/>

<https://prs.dgf.uchile.cl/a-60-anos-del-megaterremoto-de-valdivia-tres-miradas-al-evento-sismico-de-mayor-magnitud-registrado-en-el-mundo/>

<https://prs.dgf.uchile.cl/los-terremotos-tambien-son-nuestro-patrimonio-las-huellas-sismicas-de-santiago/>

<https://radio.uchile.cl/2020/07/07/terremoto-8-de-julio-de-1971-de-la-tragedia-a-la-creacion/>

<https://www.uchile.cl/noticias/165033/terremoto-del-71-una-experiencia-de-reconstruccion-y-reactivacion>

<https://soundcloud.com/user-438740904/prs-los-terremotos-tambien-son-nuestro-patrimonio-juliette-marin-prs>

## VII. LÍNEA RIESGO EN CONTEXTO ANDINO

### **Integrantes Equipo Investigador**

#### **Investigador responsable:**

**Investigadores del Equipo:** Jaime Campos; Julián Cortés Oggero, Juliette Marin Ríos  
Sandra Rojas Barlaro

Chile, por sus características geográficas en el contexto andino, es un país particularmente expuesto a múltiples amenazas, que se destacan tanto por su frecuencia, intensidad, simultaneidad y la relación que entre ellos se produce, lo que genera efectos en cadena. Por ejemplo, los terremotos pueden causar otros procesos geofísicos como tsunamis, aluviones, deslizamientos, avalanchas, lo que repercute asimismo en consecuencias socionaturales (damnificados, destrucción de ciudades, desplazamientos forzados, etc) y económicas.

El aumento del impacto de los desastres y la complejidad de los procesos que a raíz de ellos se generan, nos confrontan con desafíos tanto científicos como sociales que requieren nuevos y originales puntos de vista que aborden el problema en su complejidad y que nos invitan a arriesgarnos a nuevas miradas disciplinares para una construcción más completa del conocimiento.

Estos fenómenos complejos necesitan entonces un mayor conocimiento para entender sus variaciones y desarrollar técnicas y herramientas para la toma de decisiones que integren la reducción del riesgo de desastres socionaturales.

Estos fenómenos recurrentes pautean nuestro desarrollo como país. Terremotos, erupciones volcánicas, aluviones, remociones en masa y tsunamis, no sólo generan muertes y daños que impactan el desarrollo social y económico (la atención a la emergencia ante desastre representa entre 1 y 2% del PIB nacional) sino que han influido en leyes e instituciones.

Los compromisos asumidos por el Estado de Chile, a través de la suscripción a los principios del “Marco de Acción de Hyogo 2005-2015” y luego del “Marco de Acción de Sendai 2015-2030”, la dictación de un Plan Nacional de de Protección Civil, la creación de una Plataforma Nacional para la la Reducción del Riesgo de Desastres, la elaboración de una Estrategia Nacional para la Reducción de Riesgos de Desastres y la discusión en torno a una nueva institucionalidad en Reducción de Riesgos de Desastres, nos exhorta como

Academia a lo menos a sentarnos y discutir acerca de los alcances del concepto de Riesgo, sobre todo por sus consecuencias en las políticas públicas.

Así, la identificación y caracterización los nuevos Riesgos nos obligan a pensar “nuevas formas de gobernanza” que trasciendan las limitaciones funcionales y las fronteras territoriales de la tradicional forma del “Estado-Nación”.

- Teoría del riesgo siconatural.
- Gobernanza e institucionalidad del riesgo.
- Desastres siconaturales y responsabilidad del Estado.
- Vulnerabilidades territoriales, energéticas y desastres siconaturales.
- Resiliencia urbana y políticas públicas territoriales en contextos de desastres siconaturales.

#### Publicaciones del periodo

Marin, J., Cortés, J., Aliste, E., & Campos, J. (2020). Scientific controversy as a disaster risk factor: The 2007 seismic crisis in Patagonia, Chile. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 101639.

Cortés, J; Marin, J; Campos, J & Aliste, E. (2020) Riesgos siconaturales. Una discusión interdisciplinaria sobre el rol de la ciencia, la tecnología y el Derecho en periodos de crisis. *Cuadernos de Beaucheff*(IV), 17-38

## VII. LÍNEA FORMACIÓN

### **Integrantes Equipo Investigador**

**Investigadora responsable:** Juliette Marin

**Investigadores del Equipo:** Jaime Campos; Julián Cortés, Sandra Rojas

### **1. Diploma Gestión, Ingeniería y Ciencias para la Resiliencia a los Desastres**

En este informe se presenta el reporte de la tercera versión del “Diploma de Postítulo en Gestión, Ingeniería y Ciencias para la Resiliencia a los Desastres”, que se gestiona desde la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, con el apoyo de la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo, AGCID.

El PRS participó en el diseño de este programa de formación, cuyo objetivo es entregar a cuadros profesionales de Latinoamérica y el Caribe conocimientos avanzados, herramientas de las ingenierías y últimos antecedentes científico-tecnológicos a actores involucrados en la reducción del riesgo de desastres para que puedan concebir, diseñar, implementar, operar y evaluar proyectos que contribuyan a la reducción del riesgo de desastres socionaturales y a la resiliencia.

Fundamentalmente está orientado a profesionales pertenecientes a instituciones públicas y/o organizaciones sociales, públicas o privadas, responsables de implementar políticas públicas en RRD en el marco de un proceso de innovación sostenible y de diálogo Sur-Sur.

La tercera edición del Diploma fue adaptada para desarrollar un proceso de formación on line, debido a la pandemia COVID-19. Se realizó entre el 31 de agosto y el viernes 18 de diciembre de 2020. Contó con la participación de 27 profesionales especialistas en temas de riesgo de diversos países de la región: Perú, Ecuador, Haití, México, República Dominicana, Guyana y Brasil, así como de instituciones públicas chilenas (ONEMI, Fuerza Aérea, Ministerio de Obras Públicas, Dirección Meteorológica de Chile y Ministerio de Vivienda y Urbanismo).



Al igual que en las dos versiones anteriores, el Diploma contempla 5 módulos de contenidos y un taller participativo con análisis de casos para potenciar el intercambio de experiencias, saberes y procesos de aprendizajes y formación continua con un enfoque orientado al aporte científico-tecnológico en las estrategias de RRD en el contexto andino.

Los 5 módulos son:

Módulo 1: Avances conceptuales y normativas sobre riesgo de desastres

Módulo 2: Nuevos antecedentes sobre amenazas naturales

Módulo 3: La reducción de riesgos a través de la gestión pública

Módulo 4: Vanguardia tecnológica para la resiliencia

Módulo 5: Mitigación de desastres y preparación

## **2. Curso de Formación General ‘Contexto Andino y fenómenos extremos: Nuevos paradigmas y controversias a 10 años del megaterremoto del 27F’**

En el semestre de otoño 2020, se dictó por primera vez el Curso de Formación General llamado “Contexto Andino y fenómenos extremos: Nuevos paradigmas y controversias a 10 años del megaterremoto del 27F” diseñado y desarrollado por el Programa Riesgo Sísmico.

La creciente magnitud y frecuencia de desastres y situaciones de emergencia durante las últimas décadas han dejado en evidencia una crisis en el modelo de gobernanza, que no es capaz de dar respuesta a los nuevos desafíos que nos plantea el siglo XXI. A este respecto, si miramos en retrospectiva, el terremoto del 27 de febrero de 2010 marcó un hito en la historia de Chile, con profundas consecuencias sociales, económicas, políticas e institucionales aún en pleno desarrollo. A 10 años de este desastre, el curso propuso reflexionar con las y los estudiantes sobre los avances y los desafíos que plantea el riesgo de desastres, tanto como científico/as, profesionales y habitantes.



El CFG se desarrolló en tres módulos:

1. Contexto Andino y eventos extremos
2. Controversias y nuevos paradigmas científicos
3. ¿Cómo habitamos los territorios?

En esta primera edición del curso participaron 22 estudiantes provenientes de 9 unidades académicas de la Universidad de Chile (Fac. Ciencias Químicas y Farmacia, Instituto de Asuntos Públicos, Facultad de Ciencias, Facultad de Derecho, Facultad de Ciencias Sociales, Facultad de Ciencias Agronómicas, Programa Académico de Bachillerato, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas), que pudieron aportar con sus miradas disciplinarias en análisis grupales multi e interdisciplinarios.

Participaron también como invitada/os la/os profesora/es Anahi Urquiza (FACSO) y Enrique Aliste (FAU).

El curso fue adaptado a la modalidad online. Tras ser evaluado muy positivamente por el conjunto de las y los estudiantes, por el equipo docente y el equipo 'Programa de Formación General', el curso se volverá a dictar en el semestre de otoño 2021, incorporando elementos emergentes de la retroalimentación de esta primera edición.

## VIII. LÍNEA EXTENSIÓN Y DIFUSIÓN EDUCATIVA

**Investigador responsable: Sandra Rojas**

**Investigadores del equipo: Sebastián Barría, Paula Fredes, Juliette Marin, Julián Cortés, Jaime Campos**

### 1. Proyecto Asociativo Regional Explora 2019-2022

El Programa Riesgo Sísmico postuló y se adjudicó esta iniciativa al actual Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, a fines de 2018. La propuesta se denominó “Ciencia Abierta y Colaborativa para el Buen Vivir” y consiste en un conjunto de programas dirigidos a las comunidades educacionales y público abierto, de 22 comunas del sector Sur Poniente de la Región Metropolitana, durante 4 años.

En su segundo año, 2020, los programas debieron adaptarse al contexto de pandemia y se reformularon de la siguiente manera:

**Investigación Científica Escolar:** Debido a las condiciones de trabajo remoto, se invitó a los y las estudiantes a realizar investigaciones cualitativas y/o cuantitativas NO experimentales, como: investigación en ciencias e innovación del tipo bibliográfica, etnografía, cartografía, entre otras, de acuerdo con la temática propuesta.

Se desarrollaron, finalmente, 37 proyectos de estudiantes acompañados de sus profesores/as. Las categorías fueron: I) Investigación: las investigaciones deben buscar responder una pregunta, que esté contemplada dentro de las siguientes disciplinas: Ciencias Naturales y Exactas, Ciencias Sociales y Artes y Humanidades. II) Innovación: considera el desarrollo de proyectos con base científica-tecnológica que busquen resolver problemas que afecten a su entorno o comunidad.

El trabajo de asesoría científica, a través de talleres, y el programa de acompañamiento se realizó de manera virtual a través de plataformas. En lugar de Congreso Regional, se realizó un programa audiovisual on line, que favoreció la presencia de las provincias de nuestro territorio.

**Campamento Docente:** Durante este segundo año de ejecución (2020) no se realizó el Campamento Explora propiamente tal, sino que se planificaron actividades orientadas a

promover la formación de comunidades de aprendizaje y redes de colaboración entre los docentes, donde se integrará a los profesionales de la versión 2020 (20 personas) y aquellos que se quieran sumar durante 2021 (30 personas). Las 3 jornadas en modalidad de seminario online, más trabajo de formación asincrónica, están previstas para enero 2021.

**Ciencia Abierta:** Esta actividad es la heredera de la iniciativa “1000 Científicos 1000 Aulas”. Para 2020, a partir de un sondeo entre las y los docentes y distintos públicos, se realizó una oferta de acciones de divulgación científica en distintos formatos: narraciones científicas, cápsulas, talleres científicos y Ciclos de conversatorios. Éstas serán difundidas con gráficas y productos audiovisuales. Se utilizaron plataformas ya existentes, con las que se obtuvieron buenos resultados de audiencia directa y visualizaciones.

**Festival de la Ciencia:** Se trata de un evento nacional de divulgación científica que se realizó del 11 al 15 de noviembre. Desde el proyecto Explora Sur Poniente, la oferta incluyó: programación radial (Radio Universidad de Chile), campaña de contenidos (instalada en Estación Central, Metro tren y Flota Buses Talagante), actividades on line (charlas, talleres, contenido interactivo), videos y podast para todas las edades.

La apuesta llevó por nombre “**Ciencia sin Límites, celebremos la curiosidad**” y durante cinco días, el festival buscó desafiar las fronteras de lo conocido y lo incierto, de lo tradicional y lo vanguardista, mezclando disciplinas como la robótica con la medicina, la danza con la tecnología, la música con la sismología o los estudios de género con la ingeniería.

Cada jornada contó con su propio eje temático, divididos en “Nuevos límites tras la pandemia”, “Arte y ciencia sin límite”, “Sin límites urbano y rural”, “Diversidad sin límites” y “Desafíos sin límites”. La oferta se entregó a través de la plataforma [www.festivaldelacienciasurponiente.cl](http://www.festivaldelacienciasurponiente.cl) y las redes sociales de [Explora Sur Poniente](#).

En síntesis se realizaron 21 gigantografías de campaña Ciencia sin límites en Metrotren, Flota Talagante, Paleta Publicitaria Cerrillos, 3 videos de campaña exhibidos en hall Estación Central Metro YV, pantallas Hospital San Juan de Dios, 1 sitio web ([www.festivaldelacienciasurponiente.cl](http://www.festivaldelacienciasurponiente.cl)) que seguirá activo durante 2020, más de 30 actividades on line, 166 productos audiovisuales, más de 5 organizaciones colaboradoras, más de 95 especialistas, más de 30 periodistas, 57.545 espectadores en redes sociales,

18.191 participantes en experiencias on line, más de 35.000 auditores en señal on line y 2.500 en el dial de Radio Universidad de Chile, más de 40 apariciones en medios.

**Festival Escolar de Comunicación Científica:** el año 2019, se llevó a cabo el festival “*La ciencia del teatro*”, con la participación de 15 grupos de teatro escolar y con más de 100 estudiantes de distintas comunas de la región. Este año 2020, dada la contingencia sanitaria, esta actividad regional se reemplazó por el Festival Escolar de Comunicación Científica Escolar en vista de la dificultad de la conformación de los elencos, de realizar los ensayos y la incierta posibilidad de realizar una exhibición teatral. En esta nueva iniciativa se invitó a estudiantes de básica y media a crear sus propios podcasts con temática científica. Para ello, se dispuso de talleres y asesorías virtuales en distintas áreas, dirigidos a las y los estudiantes y sus profesores, de manera que, una vez completado el ciclo de producción, sus productos comunicacionales sean parte del Festival. El Festival culminó con la transmisión de los podcasts a través de la Radio Universidad de Chile.

**Ciencia Ciudadana:** ésta es la iniciativa más innovadora del proyecto Explora RM Sur Poniente. Se trata de una actividad que busca diseñar e implementar una propuesta de investigación donde los ciudadanos tengan un rol activo como investigadores, que se genere en respuesta a problemáticas o intereses identificados por la comunidad y cuyos resultados se comunican de manera cercana y abierta al público. En 2019, un grupo de profesionales de diversas disciplinas decidió trabajar con 4 comunas del sector Sur Poniente de la RM que cumplían con altos estándares de Certificación Ambiental en establecimientos escolares: Estación Central, Calera de Tango, Maipú y el Monte. Después de talleres y conversaciones con personas de todas las edades, se llegó a la conclusión de que el tema principal de interés en todas las comunas era el agua; tanto el uso como la calidad, distribución, acceso, escasez, entre otros aspectos. En los encuentros participaron un total de aproximadamente 200 personas, a su vez estas personas han invitado a otros que se han ido sumando a un ciclo formativo de “investigadores ciudadanos” que se ha llevado a cabo a lo largo del 2020 en formato online debido a la pandemia. Como cierre de este proceso, se realizó una encuesta de percepción sobre calidad y acceso al agua en la RM, en la que participaron más de 700 personas.

## 2. Diseño y Comunicación Visual

### Objetivos:

Difundir la labor del Programa Riesgo Sísmico por medio de material gráfico, interactivo y audiovisual acorde a las nuevas tecnologías y tendencias en medios digitales. Se busca utilizar el diseño como herramienta de comunicación científica, utilizando un lenguaje simple y directo para transformar contenidos complejos en mensajes relativamente simples y atractivos para el público.

### Tareas realizadas

#### I. Sitio web. Estado de avance: 100%

Creación nuevo sitio web del PRS con plataforma de administración, contenido dinámico y énfasis en las líneas de investigación. Incluye manual de instrucciones para uso de dicha plataforma. También se hace migración de todas las noticias y/o actividades publicadas en la web antigua.



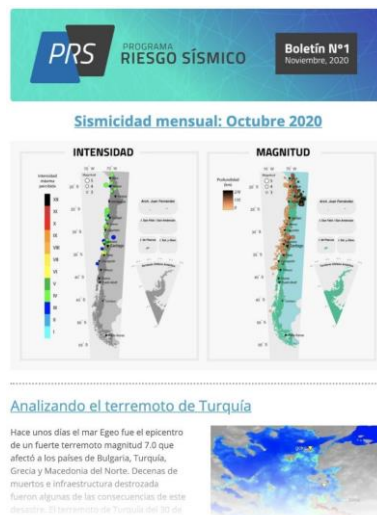
## II. **Mantenición web. Estado de avance: tarea permanente.**

Publicaciones frecuentes de noticias, actividades, columnas, etc., además de actualización interna de la plataforma (nuevas versiones y plugins). Esto incluye también la creación de nuevas secciones (recientemente, “sismicidad mensual”) o modificaciones a la estructura del sitio (inclusión banners, nuevos integrantes, actualización de contenidos, etc.). Además, se entrega semestralmente un resumen de las estadísticas de visitas del sitio web (cantidad de visitas mensuales, localización de las visitas, secciones/noticias más visitadas, etc.).

A continuación, se muestran las noticias y/o actividades publicadas desde el lanzamiento del sitio web:

1. *La figura del Cristo de Mayo y el terremoto de Santiago en 1647*
2. *Programa Riesgo Sísmico colabora en documento sobre gestión del riesgo ante desastres con perspectiva de género*
3. *Modelamiento de la sismicidad desde el punto de vista de los sistemas complejos*
4. *El Programa Riesgo Sísmico expande sus redes*
5. *Los moais que derrumbó el tsunami del terremoto de Valdivia*
6. *A 60 años del megaterremoto de Valdivia: Tres miradas al evento sísmico de mayor magnitud registrado en el mundo*
7. *Aprendizaje internacional en manejo de datos sísmicos*
8. *La importancia de la fuente sísmica en el modelamiento de Tsunamis*
9. *Los terremotos también son nuestro patrimonio: las huellas sísmicas de Santiago*
10. *A 60 años del terremoto de Valdivia: Los misterios que los sismólogos siguen tratando de descifrar*
11. *Terremoto 8 de julio de 1971: de la tragedia a la creación*
12. *Conversaciones sobre la Tierra: “Hacia dónde va la sismología del futuro”*
13. *La integración de las ciencias ante los desafíos de la sociedad moderna*
14. *A 25 años del terremoto magnitud 8.1 en Antofagasta*
15. *Modelos del sismo de Huasco*
16. *Explora Sur Poniente invita a participar en la Encuesta Ciudadana por el Agua*
17. *Analizando el terremoto de Turquía*
18. *Festival Ciencia sin Límites te invita a celebrar la curiosidad*
19. *El PRS presente en el FECl*
20. *PRS participa en cabildo abierto de CITRID: Constitución y desastres siconaturales: hacia una mirada participativa y sustentable*
21. *FECl: Entrevista a Sergio Ruiz, integrante PRS, en “Nuevos conocimientos de la Ciencia: cómo aporta al desarrollo de lo urbano y lo rural”*
22. *III Jornada de Postgrado en Geofísica*
23. *Tsunamis Trans-Oceánicos*

### III. Boletín. Estado de avance: tarea permanente.



El boletín, con su campo de suscripción ubicado en la parte inferior del sitio, se configura y diseña en base a una funcionalidad interna de la plataforma que permite, además, almacenar la base de datos con la lista de destinatarios o contactos del PRS. La tarea consistió entonces en importar dicha base de datos, ordenarla por categorías y crear un diseño en base a una plantilla. El envío del primer boletín sigue pendiente, ya que la idea de servir como un simple resumen de noticias publicadas en la web, considera luego incluir la sismicidad mensual. El primer envío sigue pendiente.

#### IV. Línea de tiempo. Estado de avance: 99%

Se elabora la “Línea de tiempo de la sismología en Chile” como una sección nueva

dentro del sitio web, con estructura e interfaz exclusiva para su cometido de línea de tiempo interactiva. La realización de la cronología considera fuentes como “Sismos y Sismología en Chile” de Cinna Lomnitz, “Historia de la sismología en Chile” de Federico Greve, “Historia de la sismología en Chile” de Armando Cisternas y otras fuentes ligadas a la FCFM, así como material fotográfico obtenido de memoriachilena.cl, entre otros.







**V. Elaboración de gráficas y contenido audiovisual. Estado de avance: tarea permanente**

Creación de gráficas o infografías simples para complementar artículos, actividades, noticias o como material de difusión en redes sociales.



Gráfica que acompaña a la noticia “El PRS expande sus redes”



Infografía Terremoto de Illapel, 1971 presente en la nota: “Terremoto 8 de julio de 1971: de la tragedia a la creación”

Geofísica te invita a:  
**CONVERSACIONES SOBRE LA TIERRA:**  
**"HACIA DÓNDE VA LA SISMOLOGÍA DEL FUTURO"**

**Prof. Jaime Campos**  
 Director del Programa Riesgo Sísmico y académico del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

**28 julio, 18:30 horas**

Conversatorio en directo vía Facebook:  
 - DGF (@geofisicachile)  
 - Programa Riesgo Sísmico (@PRSísmico)  
 - PAR Explora RM Sur Poniente (@ParExploraSP)

ORGANIZADOR: fcfm Geofísica, Explora, PARSÍSMICO, PPS RIESGO SÍSMICO, UNIVERSIDAD DE CHILE. COLABORADOR: fcfm Biblioteca Central.

Afiche “Conversaciones sobre la Tierra”



Infografía Sismo de Huasco, 2020.



Video “Línea de tiempo de la sismología en Chile”:

<https://www.youtube.com/watch?v=hfpGde8xxmc>

El lanzamiento de la línea de tiempo previamente descrita contempla también la creación de un breve video promocional animado con las siguientes características:

Formato: mp4 Resolución: 1920x1080 px Duración: 20 segundos.

Video pensado para ser difundido en redes sociales y destacarse en la portada del sitio.

### Observaciones y futuros avances

Quedan pendientes una o dos gráficas a realizar para noviembre/diciembre y un video infográfico a realizarse en diciembre.

Infografía: en principio, tratará sobre la falla de San Ramón y cómo se ha estudiado desde el PRS.

Video: tendrá una duración de dos a tres minutos y abordará un área de la línea de Sistemas Complejos, específicamente lo explicado en este artículo.

Actualmente el video se encuentra en fase temprana. Hay escrito un borrador con el guion que está actualmente en corrección con Cristian Siegel. Las siguientes fases corresponden a: storyboard, ilustración, animación y narración.