

La base de datos de movimiento fuerte del Centro Sismológico Nacional

The strongmotion database of the Centro Sismológico Nacional

Fecha de entrega: 24 de octubre 2023

Fecha de aceptación: 25 de enero 2024

Felipe Leyton y Bruno García

Universidad de Chile, Centro Sismológico Nacional, Beauchef 850, Santiago, Chile, leyton@csn.uchile.cl (orcid: 0000-0002-6438-4045), bgarcia@csn.uchile.cl

Desde su creación en 2012, el Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile ha administrado las redes sismológicas que monitorean la sismicidad en Chile. Parte de ella, lo componen más de 400 acelerómetros, algunos de ellos grabando en continuo y otros con gatillo. De esta extensa red, se ha recolectado registros para más de 3000 eventos chilenos. Estos registros presentan una invaluable herramienta para el conocimiento de la sismicidad en Chile y el comportamiento de los suelos en ciudades y localidades chilenas. En este trabajo se muestran algunas herramientas para el uso de esta extensa base de datos, junto con algunas características que facilitan su uso. Ello abre una puerta de acceso a toda la comunidad para que se nutra de estos datos.

Palabras clave: movimiento fuerte, base de datos, Centro Sismológico Nacional

Since its creation in 2012, the Centro Sismológico Nacional (National Seismological Center) of the Universidad de Chile has managed the seismological networks that monitor seismicity in Chile. Part of it is composed of more than 400 accelerometers, some of them recording continuously and others with a trigger. From this extensive network, records have been collected for more than 3000 Chilean events. These records present an invaluable tool for the knowledge of the seismicity in Chile and the behavior of the soils in Chilean cities and towns. This work shows some tools for the use of this extensive database, together with some features that facilitate its use. This opens a door of access to the entire community to nourish by these data.

Keywords: strongmotion, database, National Seismological Network

Introducción

El Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (CSN) fue mandatado por el Gobierno de Chile para, a principios de 2012, gestionar y mantener la Red Sismológica Nacional (RSN) (Barrientos y CSN, 2018). Es así como se inicia una campaña de instalación de diversos sensores sísmicos, tales como bandas anchas, GNSS y acelerómetros, los cuales permiten el registro en tiempo real de movimientos del suelo en velocidad, desplazamiento y aceleración, respectivamente. Esta importante red de más de 100 sitios distribuidos a lo largo de Chile, se le complementa con las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos, compuesta por casi 400 sensores de movimiento fuerte, instaladas principalmente en zonas urbanizadas de Chile (Leyton *et al.*, 2018a). Es

así como se logra una rica fuente de datos de movimiento fuerte, entregando la posibilidad de analizar tanto el comportamiento de los suelos chilenos como describir las fuentes de los grandes terremotos.

Para gestionar y distribuir adecuadamente este extenso catálogo de datos es que se genera la Base de Datos de Movimiento Fuerte del CSN; cuyo principal objetivo es proveer a los usuarios de información de alta calidad de registros de aceleración relevantes para la ingeniería y el mundo de las geociencias. En esta base de datos se publican los registros de las estaciones de la RSN de los eventos de magnitud igual o superior a 5.0 y que excedan una aceleración horizontal máxima de 5% de g (aceleración de gravedad). Estos datos son todos los gatillos de las estaciones de la RNA relacionados directamente a un

evento sísmico, independiente de su magnitud. Los datos de la RSN son enviados en tiempo real a la Oficina de Procesos y Análisis del CSN; mientras que los datos de la RNA son, en su gran mayoría, recolectados en terreno por personal del CSN.

En el presente artículo se muestran los avances de la Base de Datos de Movimiento Fuerte del Centro Sismológico Nacional, un esfuerzo en constante desarrollo, con el importante apoyo del Equipo de Terreno del CSN.

Datos

La Base de Datos de Movimiento Fuerte parte con la creación del Centro Sismológico Nacional en 2012; desde ese entonces, gracias al significativo aumento de estaciones en el territorio nacional, se han registrado más de 3400 eventos. En la Figura 1(b) se presenta un mapa con todos los eventos pertenecientes a esta base de datos; el color es proporcional a la profundidad, según la escala del borde inferior. De este panel es posible ver que gran parte de los eventos se encuentran al norte de 40° S, alcanzando profundidades de casi 300 km.

En la Figura 1(a) se muestran la distribución de los 17337 registros pertenecientes a la base de datos, en términos de magnitud y distancia hipocentral; además, se agregan los histogramas respectivos en cada caso. De ella es posible ver que la mayor parte de los registros se encuentran entre 50 y 120 km de distancia; por otro lado, la mayor cantidad de registros pertenecen a sismos con magnitudes entre 4.0 y 5.2, con un importante aumento para sismos con magnitud 5.0. Además, es posible ver que la base de datos contiene un número muy reducido de registros a distancias menores de 50 km, al igual que para terremotos de magnitud 7.0 o superior. La primera observación se debe a las características tectónicas de la subducción chilena, mientras que la segunda se debe a la ausencia de sismos con magnitudes entre 7.0 y 8.0 en los últimos 10 años.

Otra mirada que es posible hacer de la distribución de los datos es en función de la latitud en la cual se encuentra la estación que grabó el registro. En la Figura 2(a) se muestra un mapa con la localización de las estaciones que han aportado registros a la base de datos. Por otro lado, en la Figura 2(b) se muestra el número de registros en función de la latitud. Ello permite ver que una gran cantidad de

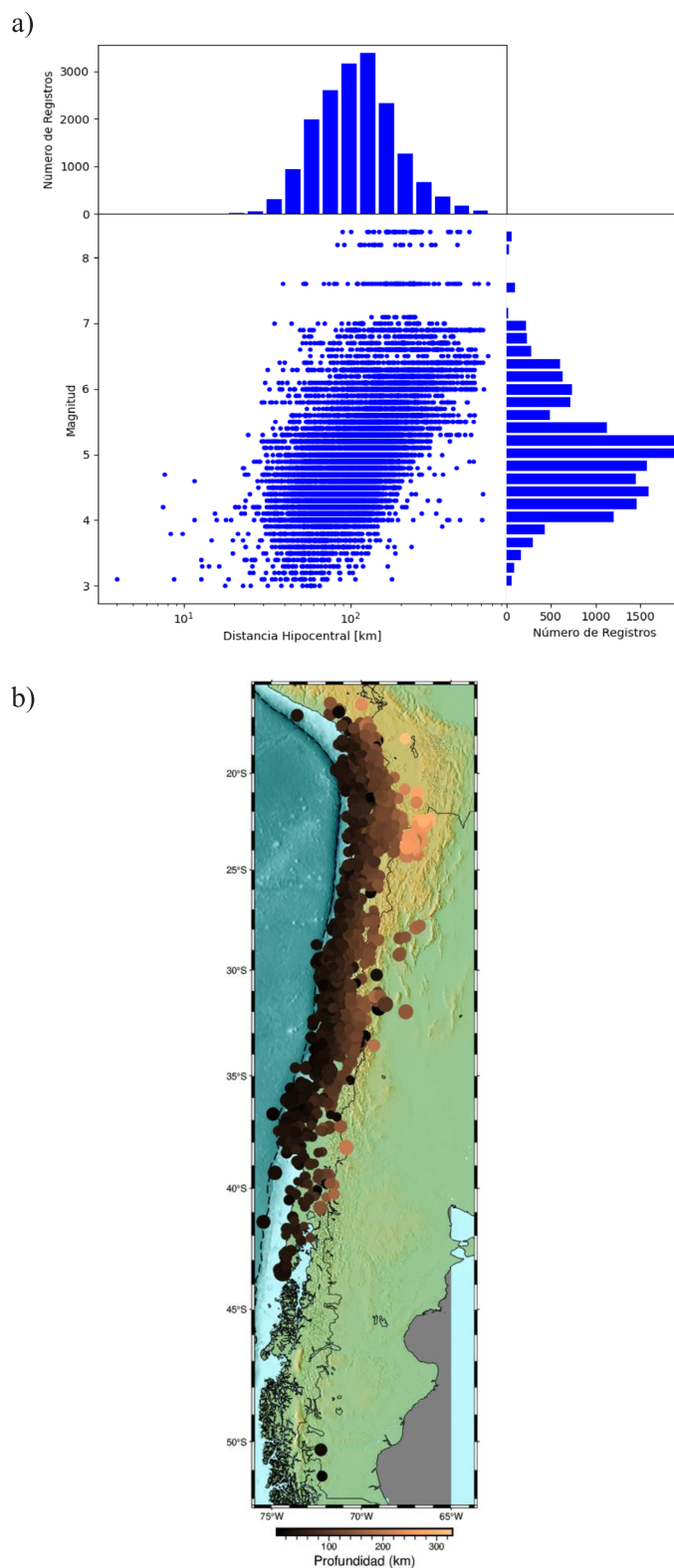


Figura 1: a) Distribución de los registros en función de la distancia hipocentral y magnitud, al igual que los histogramas en ambos casos y b) mapa con la localización de los eventos incluidos en la base de datos, el color es proporcional a la profundidad siguiendo la escala del borde inferior

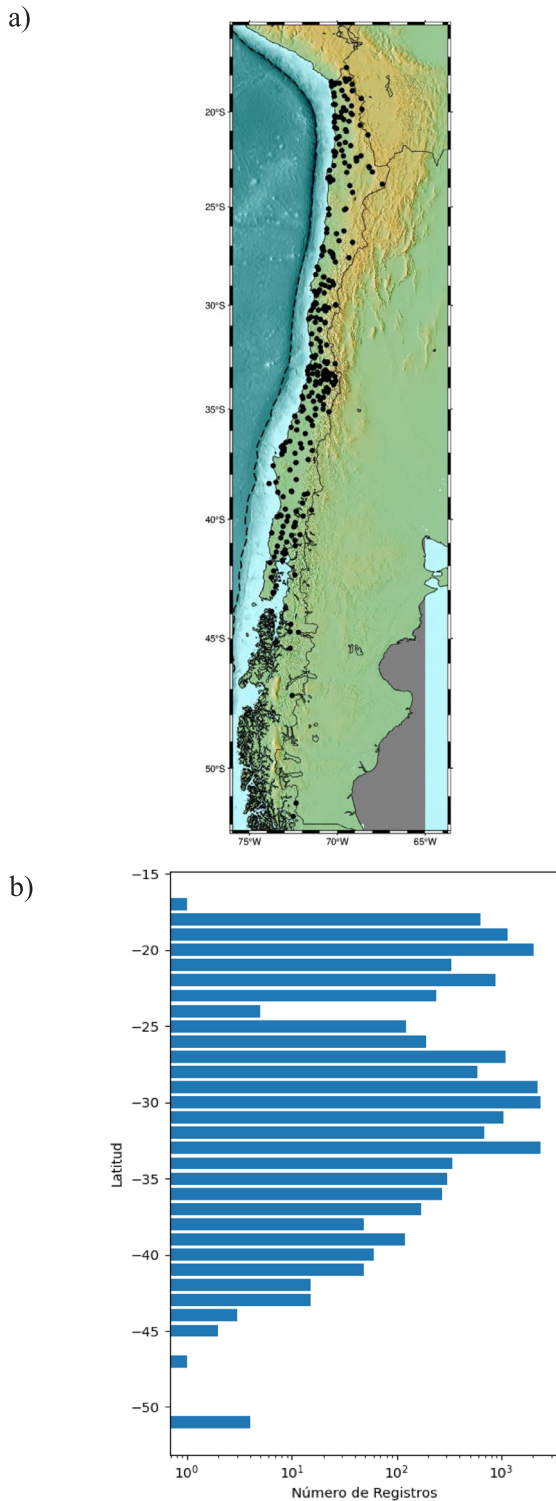
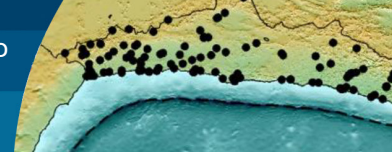


Figura 2: a) Mapa con la localización de las estaciones que han aportado eventos a la base de datos y b) número de registros en función de la latitud de la estación que lo registró

registros provienen de la zona Norte (entre 18° y 23° S), seguido de Chile Central (entre 29° y 33° S); al sur de los -40°, el número de registros decae considerablemente, debido a la baja sismicidad de la zona (ver Figura 1(b)).

Notar el uso de escala logarítmica en el número de registros. Esta base de datos ha tenido un importante crecimiento en estos últimos años; ello puede observarse en la Figura 3(a), donde se muestra el número de registros acumulados, en miles, en función del tiempo. Mientras, en la Figura 3(b) se muestra el número de registros incorporados a la base de datos en función de la fecha de ocurrencia del evento, independiente de su magnitud. De esta figura es posible ver el impacto de los terremotos de Iquique 2014 (M_w 8.2), Illapel 2015 (M_w 8.4), Valparaíso 2017 (M_w 7.9) y el sismo del 1 de septiembre de 2020 (M_w 7.0), frente a las costas cercana a Huasco; este último aportó más de 200 registros en ese día.

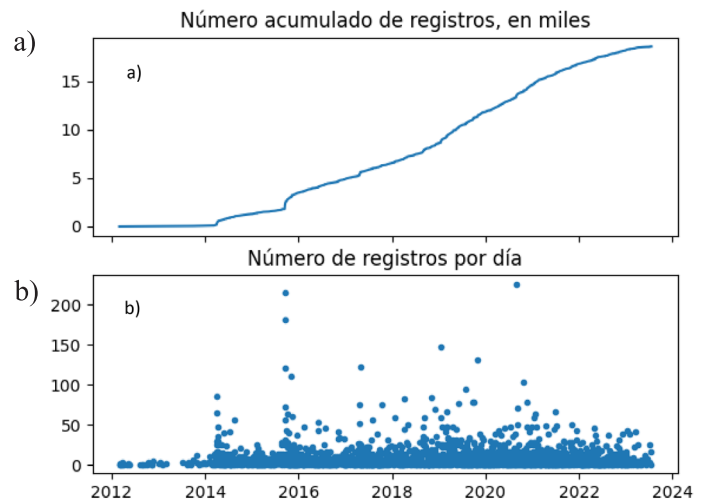


Figura 3: a) Número acumulado de registros, en miles y b) número de registros incorporados en función de la fecha de ocurrencia de los eventos, independientes de su magnitud

En la base de datos se ha utilizado la magnitud publicada por el CSN, independiente del tipo al que se trata. Hoy en día, el CSN utiliza magnitud local, para eventos con magnitudes menores a 4.5, y magnitud momento para el resto. Para esta segunda magnitud, la más usada en la base datos, se utilizan 2 metodologías para su estimación: para sismos con magnitud menor de 5.5, se usa la estimación de Brune (1970); mientras que, para sismos de mayor magnitud, se usa el análisis de la fase W (Riquelme *et al.*, 2018). A modo de validación, la Figura 4 muestra la comparación de la magnitud publicada por el CSN (en las abscisas) y la estimada por Proyecto Global de Tensores de Momento (gCMT) (Dziewonski *et al.*, 1981; Ekström *et al.*, 2012). En la Figura 4, cada cruz representa un evento,

los círculos azules su valor promedio y las barras azules su desviación estándar. De ella, es posible ver que existe una clara similitud entre las magnitudes publicadas por el CSN (CSN mag) y las estimadas por el Proyecto Global de Tensores de Momento (gCMT Mw). Cabe destacar que no es posible realizar la misma comparación para magnitudes menores pues no son publicadas por el Proyecto Global de Tensores de Momento (Dziewonski *et al.*, 1981; Ekström *et al.*, 2012).

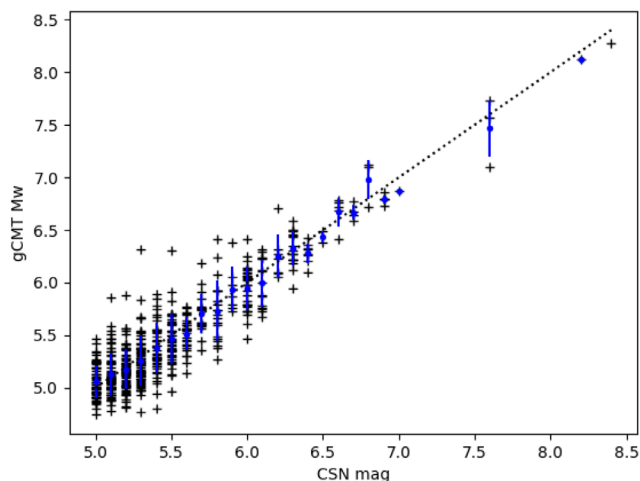


Figura 4: Comparación de estimación de magnitud de momento hecha por el CSN (CSN mag) y el Proyecto Global de Tensores de Momento (gCMT)

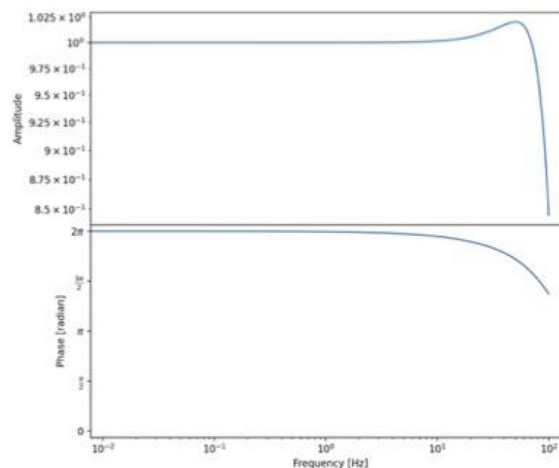
Sensores

Dentro de la Red Sismológica Nacional (RSN), que incluye todos los sensores sísmicos del CSN, se usan 2 tipos de sensores de aceleración: Guralp CMG-5T y Episensor FBA-EST; en las Figuras 5(a) y 5(b) se muestra la respuesta instrumental de ambos sensores. De estas figuras es posible ver que ambos poseen una respuesta plana en aceleración hasta los 20 Hz, sufriendo leves modificaciones tras esto. Por otro lado, respecto a la fase, el Guralp CMG-5T genera un leve cambio de fase a partir de los 10 Hz, pero para ambos se vuelve relevante a partir de los 20 Hz.

Formato de datos y series de tiempo

En la base de datos, los registros se encuentran para las 3 componentes en aceleración, las cuales se pueden acceder en dos formatos básicos:

a)



b)

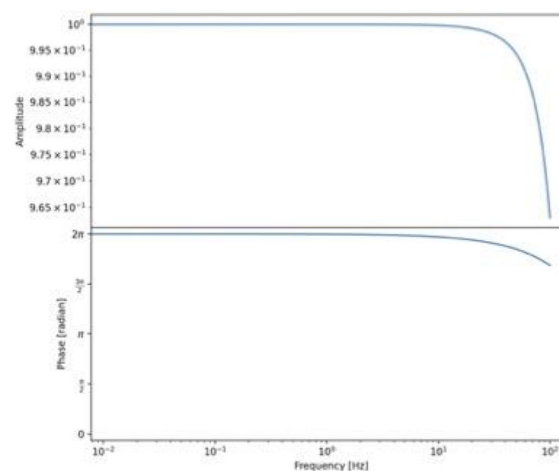
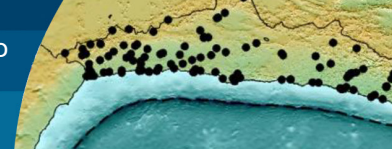


Figura 5: a) Respuesta instrumental de los acelerógrafos más usados en la RSN: Guralp CMG-5T y b) Episensor FBA-EST. En los paneles superiores se muestra la respuesta en amplitud, mientras que en los paneles inferiores se muestra la respuesta en fase, ambos en función de la frecuencia, en Hz.

1. Binario: tomado directamente de los acelerómetros, registrados en cuentas. En binario los datos se distribuyen en *miniseed* (Ekström *et al.*, 2012) o *evt* (GFZ, 2021).
2. Texto plano: convertido a unidades físicas, para fácil lectura de los usuarios. Un ejemplo se muestra en la Figura 6. Es posible ver de esta figura que el archivo parte con un breve encabezado, identificado con el símbolo '#', el cual contiene la *metadata*: Tiempo de Origen (en formato ISO8601), Tasa de muestreo, Número total de muestras, Código de la estación y componente, Coordenadas (Latitud y Longitud) y Unidades (usualmente m/s²). Acto seguido, vienen los datos en 1 columna.



El procesamiento de los datos es realizado de la misma forma, independiente del sensor en el cual se haya registrado. Ello sigue los siguientes pasos:

- Remover la media y tendencia lineal.
- Remover la respuesta instrumental, en el espacio de la frecuencia.
- Transformar de cuentas a unidades físicas.

Se evita cualquier otro tipo de filtrado para entregar los datos lo menos procesados posible a los usuarios.

```
# Tiempo de Origen: 2020-09-01T04:09:23.238300Z
# Tasa de muestreo: 100.0 muestras/seg
# Numero total de muestras: 23898
# Estacion: G004 Componente: HNZ
# Latitud: -30.173 Longitud: -70.799
# Unidades: m/seg/seg
0.0
4.1810397236933e-09
-3.360932983219597e-11
4.403580576591931e-09
3.2596387243174845e-11
2.899728983058088e-09
9.421423296585895e-10
4.34708463328416e-09
-2.074262028075146e-09
4.176467412938067e-09
2.5632165967977687e-09
1.3541008851330918e-08
-7.470794477821003e-09
8.245313262961305e-09
1.3635093563374283e-08
-1.5362061672650008e-09
-3.560773348862996e-09
```

Figura 6: Ejemplo del formato de texto plano para el evento del 1 de septiembre de 2020 a las 4:09 UTC en la estación GO04, componente vertical

Caracterización de Sitios

Para interpretar los datos de mejor manera, se han realizado caracterizaciones de los sitios en las cuales las estaciones se encuentran emplazadas. Para ello, se muestra la unidad geológica presente en la zona de la estación y una breve descripción, tomada de Sernageomin (2002). Se complementa esta información con una caracterización geofísica basada en ondas superficiales (Leyton *et al.*, 2018a). En ella, se estima la curva de dispersión, la razón espectral de la componente horizontal sobre la vertical (HVSR, por sus siglas en inglés) y, mediante un proceso de inversión no-lineal, se estima el perfil de velocidades de onda de corte (V_s); ver detalles en Leyton *et al.* (2018a). Un ejemplo es presentado en la Figura 7 para la estación C260, ubicada en el Campamento de la Dirección de Vialidad de Tongoy.

Además, en caso de cumplir los requisitos necesarios, las estaciones son clasificadas siguiendo el esquema propuesto por Idini *et al.* (2017). Este esquema se basa en la razón de espectros de respuesta de la componente horizontal sobre la vertical (HVRSR), considerando un mínimo de 5 registros de magnitud superior o igual a 5.0. Un ejemplo para la misma estación C260 es mostrado en la Figura 8; según este resultado, el sitio clasificaría como sIV – C (ver Figura 7); para más detalles, ver Leyton *et al.* (2018b).

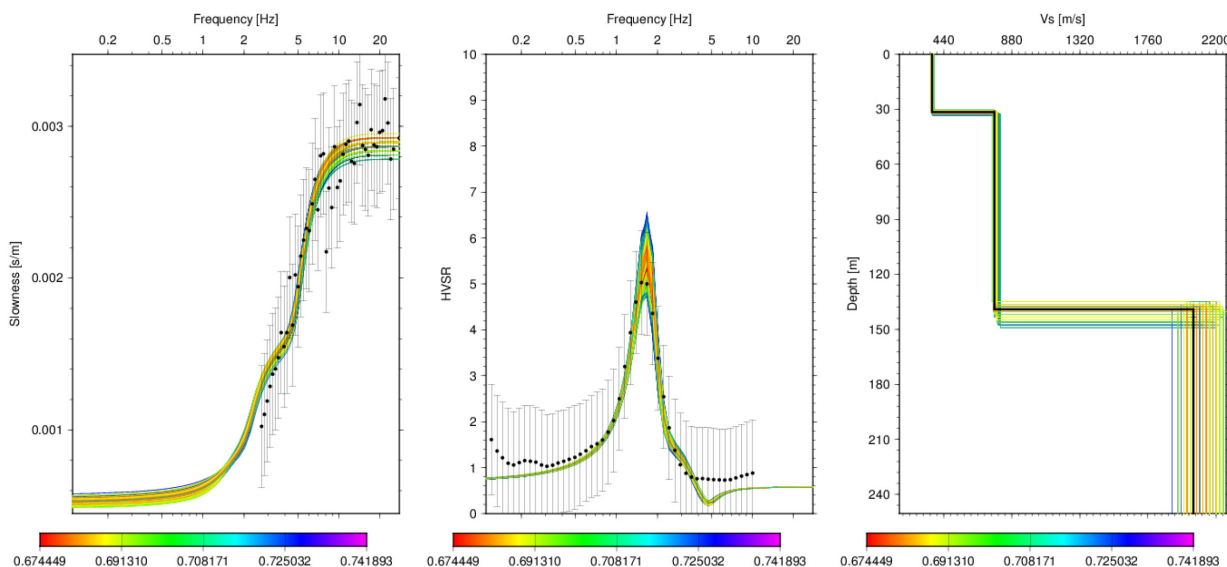


Figura 7: Ejemplos de caracterización geofísica, para la estación C260; de izquierda a derecha se presenta: estimación de curva de dispersión, elipticidad, perfil de velocidad de corte (V_s). En cada panel, en negro se presenta los datos medidos y en colores los mejores modelos, con el color proporcional al error, según las escalas mostradas en el borde inferior

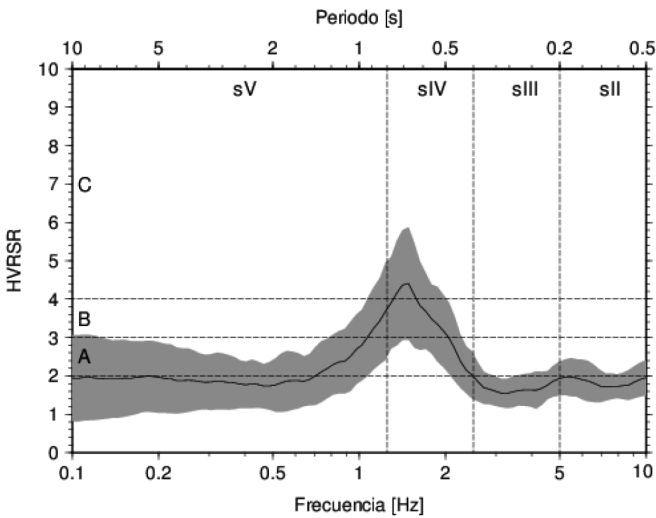


Figura 8: Razón de espectros de respuesta horizontal sobre vertical (HVRSR, por sus siglas en inglés) para la estación R12M. En negro se marca el promedio geométrico de todos los eventos y en gris la desviación estándar.

Interfaz de usuario

Para facilitar el acceso de los usuarios a los datos, se ha implementado una página web, tal como se muestra en la Figura 9. En ella, los registros son organizados en base a eventos, agrupando todos los acelerogramas de un mismo evento para su manejo. Los eventos están caracterizados por su fecha de ocurrencia (en UTC), su localización geográfica (Latitud y Longitud), profundidad y magnitud. Estos mismos parámetros pueden ser utilizados para filtrar eventos, usando el panel del borde izquierdo, ver Figura 9, bajo 'FILTRO DE REGISTROS'.

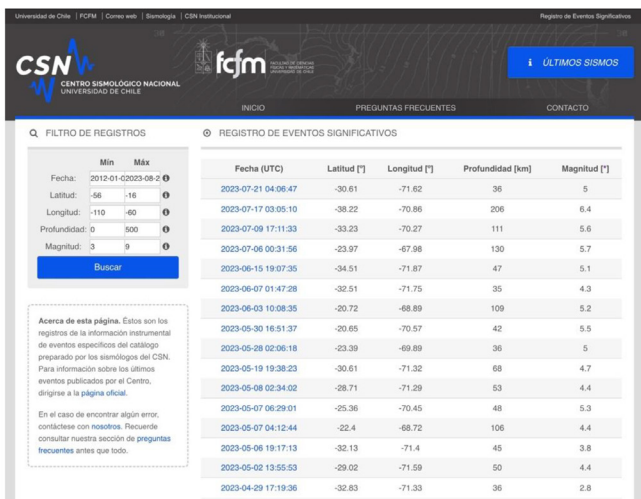


Figura 9: Interfaz web de la base de datos de movimiento fuerte.

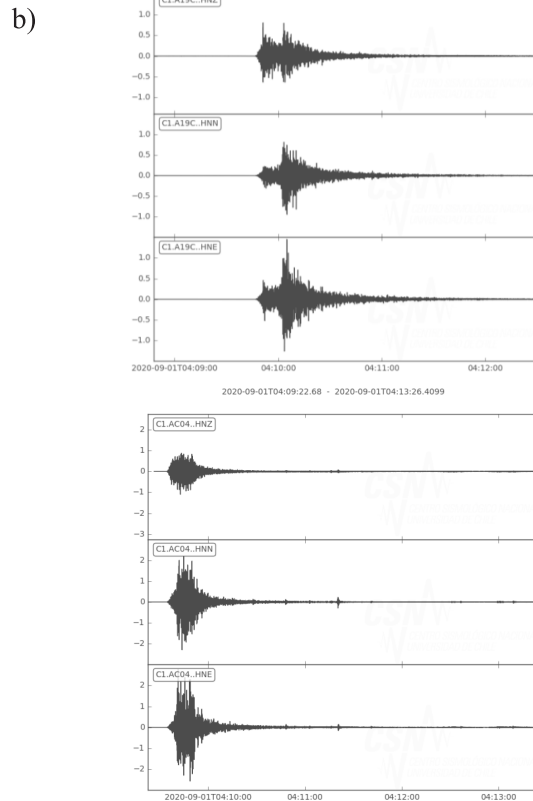
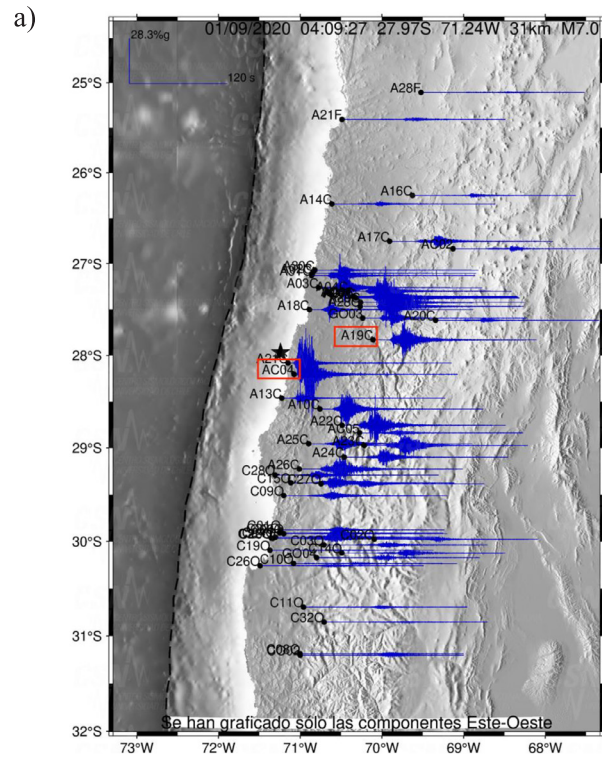
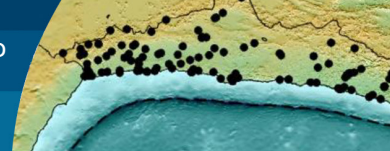


Figura 10: a) Mapa con las trazas Este-Oeste del evento de 1 de septiembre de 2020 (M_w 6.0); la estrella negra representa el epicentro, con los datos hipocentrales indicados en el borde superior del mapa y b) registros de las 3 componentes de las estaciones A19C y AC04, arriba y abajo, respectivamente.



Para facilitar la selección de los registros, para cada evento se entrega un mapa con los registros de las componentes Este-Oeste junto a la localización de la estación respectiva, tal como lo muestra la Figura 10. Además, se presentan gráficos con los registros de las 3 componentes de cada estación, como el ejemplo presentado en la misma figura, para las estaciones A19C y AC04, remarcadas en rojo en el mapa.

Comentarios finales

En el presente trabajo se muestra la base de datos del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile. Dicha base de datos contiene registros de movimiento fuerte, alcanzando a más de 17000 registros pertenecientes a 3440 eventos ocurridos en Chile. La mayor parte de los registros se encuentran entre 50 y 120 km de distancia, perteneciendo a sismos con magnitudes entre 4.0 y 5.2, con un importante aumento para sismos con magnitud 5.0. Por otro lado, es posible ver que la base de datos contiene un número muy reducido de registros a distancias menores de 50 km, al igual que para terremotos de magnitud 7.0 o superior, debido a la falta de este tipo de eventos en los últimos 10 años. Una gran cantidad de registros provienen de la zona Norte (entre 18° y 23° S), seguido de Chile Central (entre 29° y 33° S); al sur de los 40° S, el número de registros decae considerablemente, debido a la baja sismicidad de la zona.

Los datos son puestos a disposición del usuario en dos formatos: binario, provenientes directamente del sensor, y texto plano, donde se ha removido la respuesta instrumental y son entregados en unidades físicas. Para todos los sitios de emplazamiento de las estaciones se entrega una breve descripción de la geología (tomada de Sernageomin (2002)) y algunos de ellos han sido caracterizados mediante el uso de Métodos de Ondas Superficiales (Leyton *et al.*, 2018a).

Para su uso, se ha dispuesto de una interfaz web que permite explorar la base de datos en base a la información hipocentral (latitud, longitud, profundidad y magnitud del evento), permitiendo el filtrado y selección de los datos. Además, se entregan gráficos con mapas y dibujos de las formas de onda para facilitar su análisis.

Esta herramienta es un aporte importante a la comunidad, acercando la información sismológica relevante para su uso.

Agradecimientos

Agradecemos el valioso aporte del Equipo de Terreno del CSN por su invaluable labor en la recolección de los datos de la Red Nacional de Acelerómetros y a Miguel Quilaqueo, del Equipo de Tecnología de la Información TICs, por su dedicación en el mantenimiento de los servidores que alojan la Base de Datos.

Referencias

- Barrientos, S. and National Seismological Center (CSN) Team (2018). The seismic network of Chile. *Seismological Research Letters* 89(2A), 467-474
- Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research* 75(26), 4997-5009
- Dziewonski, A.M., Chou, T.A. and Woodhouse, J.H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research* 86, 2825-2852
- Ekström, G., Nettles, M. and Dziewonski A.M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 200-201, 1-9
- GFZ (2021). Data format. <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/geophysical-imaging/infrastructure/geophysical-instrument-pool-potsdam-gipp/documents/data-format>, visitado en agosto 2021
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S. and Pastén, C. (2017). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering* 15(5), 1853-1880
- Leyton, F., Leopold, A., Hurtado, G., Pastén, C., Ruiz, S., Montalva, G. and Sáez, E. (2018a). Geophysical characterization of the Chilean seismological stations: First results. *Seismological Research Letters* 89(2A), 519-525
- Leyton, F., Pastén, C., Ruiz, S., Idini, B. and Rojas, F. (2018b). Empirical site classification of CSN network using strong-motion records. *Seismological Research Letters* 89(2A), 512-518
- Riquelme, S., Medina, M., Bravo, F., Barrientos, S., Campos, J. and Cisternas, A. (2018). W-phase real-time implementation and network expansion from 2012 to 2017: The experience in Chile. *Seismological Research Letters* 89(6), 2237-2248
- Sernageomin (2002). Mapa geológico de Chile: versión digital. Escala 1:1.000.000. Publicación digital. Santiago, Chile