

LA RED SISMOLÓGICA NACIONAL

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica del mundo. A partir del arribo de los españoles, cuando se inició el registro escrito en la región a mediados del siglo XVI, ha ocurrido en promedio un terremoto de magnitud 8 o mayor cada docena de años.

7.8

6

4.4 4.8

2.9

3.5 3.7 4



SERGIO BARRIENTOS

Director del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile. Doctor en Ciencias de la Tierra de la Universidad de California, Santa Cruz, Estados Unidos, y Magíster en Ciencias mención Geofísica de la Universidad de Chile. Ha realizado investigaciones postdoctorales en el Instituto de Cooperación para la Investigación en Ciencias del Medioambiente (Universidad de Colorado) y Centro de Terremotos del Sur de California (USC). Ocupó el cargo de jefe de sección sísmica del Sistema de Vigilancia Internacional de la Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares, ubicada en Viena, Austria. contacto@csn.uchile.cl

En los últimos cien años, más de diez eventos de magnitud 8 o superior han tenido lugar en esta parte del mundo (Beck et al., 1998). Tres eventos con $M > 8$ han ocurrido sólo en los últimos seis años. Los registros históricos de daños locales, reportes de tsunamis registrados en Japón asociados a sismos chilenos y estudios paleo-sismológicos (Cisternas et al., 2005; Moernaut et al., 2014), han evidenciado que varios de estos terremotos han alcanzado magnitudes cercanas a 9 o superiores. Entre ellos se encuentra el caso de 1960, el terremoto más grande registrado en el mundo desde el inicio de la sismología instrumental (Kanamori, 1977). Tal actividad sísmica extrema en Chile es el resultado de la interacción entre las placas de Nazca, Antártica, Escocia y América del Sur. Como se muestra en la Figura 1 la mayor parte de la sismicidad de Chile es el resultado directo de la interacción entre las placas de Nazca y de Sudamérica.

EL SISTEMA DE OBSERVACIÓN

El Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (CSN), continuación del Servicio Sismológico de la misma Universidad, inició sus operaciones en marzo de 2013. La tarea de este organismo consiste en impulsar y desarrollar los aspectos observacionales de terremotos en el país con el fin de entregar la mejor, más completa, depurada y oportuna información posible relacionada con la observación del proceso de terremotos.

Para ello, se requiere instalar, mantener y operar una red sismológica que cubra todo el territorio nacional, en lo posible, rodeando completamente aquellas zonas donde se generan los sismos. Lograr este objetivo no es sencillo en un país como el nuestro, ya que posee una gran longitud y gran parte de la sismicidad se encuentra ubicada costa afuera.

Existen varios sistemas de observación sismológica permanentes en el país: a) La base del sistema de observación de la Universidad de Chile y b) estaciones que son producto de colaboraciones internacionales. En el lenguaje sismológico, una red se denomina por su código, de modo que en Chile coexisten varias redes con sus propios códigos que nutren el sistema de información sísmica del país. Las redes C y C1 son la base de la red universitaria que incluye alrededor de 80 instrumentos de seis componentes (tres que miden velocidad y tres que miden aceleración).

La red C1 está compuesta por 65 estaciones multiparamétricas (sismómetros de banda ancha, acelerómetros y equipos GNSS, Global Navigation Satellite System), además de 65 dispositivos GNSS adicionales. Este equipamiento ha sido recientemente adquirido y complementa la red original de la Universidad. La mayor parte de los datos provenientes de las estaciones de seis componentes -banda ancha y acelerográficas- se transmiten en tiempo real al Centro de Datos en Santiago, en tanto que la instalación y conexión de las estaciones de GNSS se completará durante los próximos meses. Como complemento a este equipamiento, la Oficina Nacional

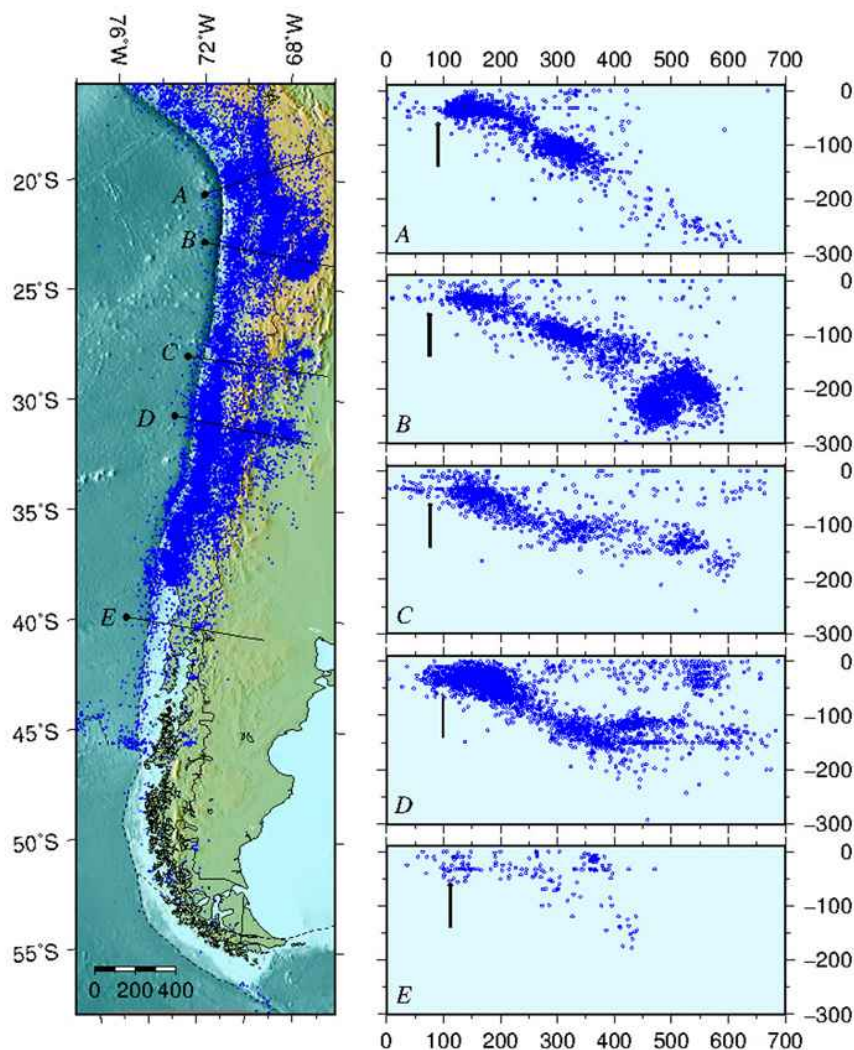


FIGURA 1.

SISMICIDAD DE CHILE. CINCO PERFILES (PANELES DE LA DERECHA) MUESTRAN LA DISTRIBUCIÓN EN PROFUNDIDAD DE LOS TERREMOTOS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DESDE LA FOSA CHILE-PERÚ. EL CATÁLOGO INCLUYE TRES FUENTES DE INFORMACIÓN SISRA (1900-1981), USGS (1982-1999), CSN (2000-2015).

de Emergencia (Onemi) del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, en cooperación con el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu) han desplegado 297 acelerógrafos, para registrar el movimiento fuerte asociado a grandes terremotos (umbral de activación a 5% g, la aceleración de la gravedad); este equipamiento se encuentra siendo transferido al CSN para su operación y mantenimiento. Se puede entender este grupo de 297 acelerógrafos como parte de una Red de Infraestructura y Suelos concebida para entregar

información acerca del comportamiento del terreno en las zonas afectadas por terremotos significativos.

Existen varios sistemas de observación sísmológica permanente en el país que son resultado de colaboraciones internacionales: IPOC, IRIS, Geoscope y GSN. El Integrated Plate Boundary Observatory Chile (IPOC, <http://www.ipoc-network.org/>) es un importante esfuerzo llevado a cabo en el norte de Chile para estudiar el pro-

ceso del ciclo sísmico en la región donde –hasta el 1 de abril de 2014– no habían ocurrido sismos interplaca de magnitud significativa desde 1877 (región costa afuera comprendida aproximadamente entre Arica y la Península de Mejillones). Las primeras instalaciones de estaciones se iniciaron en 2007 por iniciativa de GeoForschungs-Zentrum Potsdam (Alemania) que en la actualidad alcanzan a 16 estaciones multiparamétricas; en tanto que el Instituto de Física del Globo de París contribuye con cuatro estaciones multiparámetro.

Las 20 estaciones IPOC (red CX) contemplan sensores de desplazamiento GNSS (Leica), velocidad (STS-2, Streickeisen) y aceleración (Episensor, Kinematics); estos últimos incluyen sistemas de adquisición de datos Quanterra. Las variables ambientales (temperatura, presión) también se incluyen en el flujo de datos.

La Red Sísmológica Nacional cuenta además con 10 estaciones GRO (Geophysical Research Observatories Chile), que son el resultado de un proyecto de colaboración conjunta entre Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) y la Universidad de Chile, financiado por la Fundación Nacional de Ciencias de EE.UU. a partir de 2011 como consecuencia del terremoto Mw=8.8 de Maule ocurrido en 2010. Estas estaciones, parte de la red de código C (<https://www.iris.edu/hq/projects/chile>), están equipadas con sensores de velocidad (Trillium 240, Nanometrics), aceleración (Episensor, Kinematics) y sistemas de adquisición Quanterra 330. Estos instrumentos se complementan con sensores de infrasonido (Chaparral), junto con sensores ambientales (temperatura, pluviómetro y presión). Adicionalmente, el CSN se encuentra incorporando equipos GNSS a cada una de estas estaciones.

La red C1 consiste en 65 estaciones que miden velocidad, aceleración y desplazamiento del suelo. Los sensores que se utilizan son: banda ancha (Trillium 120, Nanometrics) para medir velocidad y Güralp 5T para medir aceleración, ambos con un sistema de adquisición Quanterra de 6 canales, los que son complementados con dispositivos GNSS Trimble (NetR9).

Las estaciones adicionales de la red C (LMEL, ROC1) y de la red Geoscope (PEL, COY) conjuntamente con las de GSN (Global Seismographic Network; LVC, LCO y RPN) complementan la red de observación sísmológica en el país.

La ubicación de cada estación de estos tres elementos principales, a diciembre de 2015: a) 98 sismómetros de banda ancha y acelerómetros, b) 91 estaciones GNSS y 37 por instalar, y c) 297 acelerógrafos, se muestran en la Figura 2. La separación intersensor para el elemento de la red mostrada en a) es de unos 80 - 90 kilómetros, en tanto que la red mostrada en c) se concentra principalmente en cuencas donde se han fundado ciudades; estas últimas ubicaciones han sido reportadas por Onemi.

Los datos de los 98 instrumentos de seis componentes (banda ancha y acelerográficas) se transmiten en tiempo real hasta el Centro de Datos ubicado en Santiago. Para ello se utilizan variados medios de comunicación: radio, para la mayoría de las estaciones que se encuentran en los alrededores de Santiago, satelital para aquellas que se encuentran ubicadas en zonas más alejadas, la red de comunicaciones de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) para aquellas que se pueden conectar vía radio a las torres de control de los diferentes aeropuertos del país y una combinación de radio e Internet para las restantes. Es en el Centro de Datos donde estos se procesan, analizan, distribuyen y archivan. El sistema consiste en tres servidores conectados entre sí creando ambientes virtuales donde se ejecutan los programas especializados de adquisición, procesamiento automático, análisis manual, distribución y almacenamiento de la información. Se tiene proyectado un almacenamiento de alrededor de 7 TB por año.

La localización hipocentral (coordenadas geográficas y profundidad), el tiempo de ocurrencia y la magnitud del sismo se estiman de manera preliminar, dentro de los 5 minutos de haber ocurrido, mediante el programa EarlyBird. Las soluciones finales –dentro de 20 minutos- se obtienen utilizando los programas Seisan y Seis-Comp.

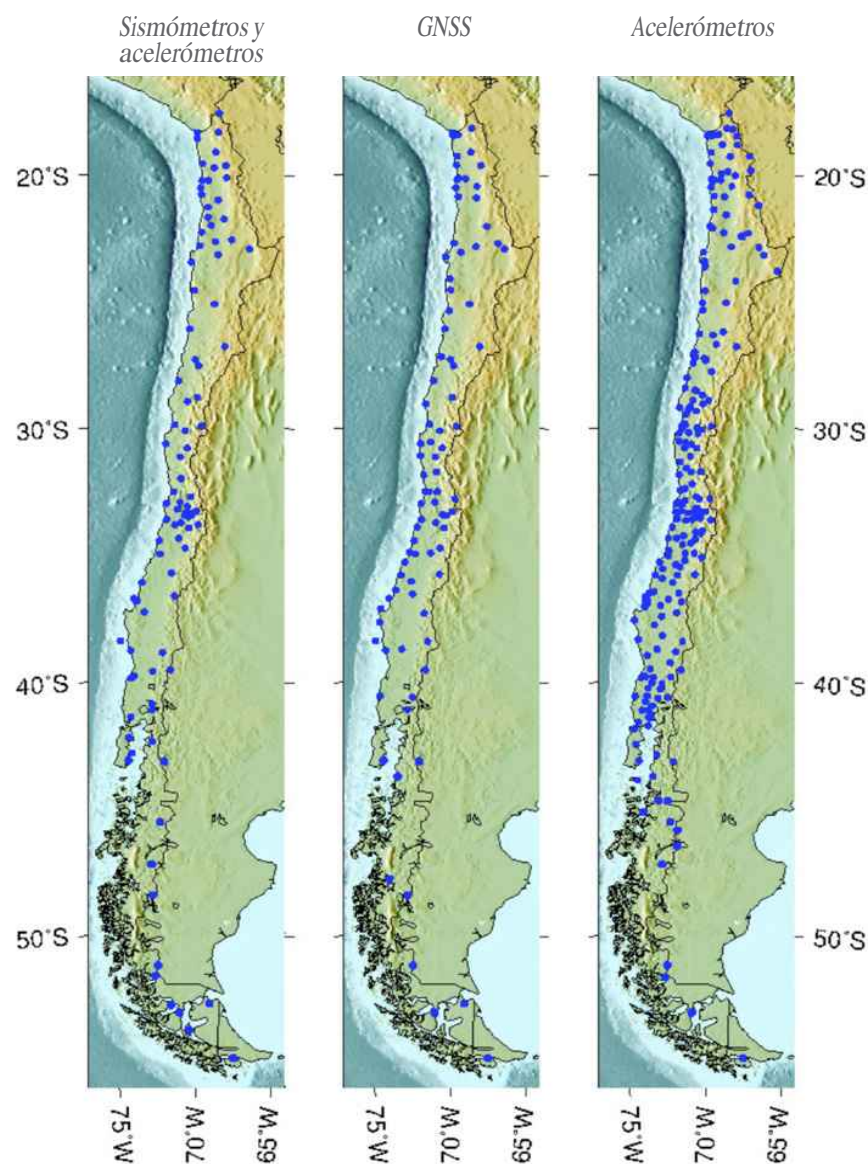


FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ESTACIONES DE LA RED SISMOLÓGICA NACIONAL. SE COMPONE DE 98 ESTACIONES DE 6 COMPONENTES (BANDA ANCHA + ACELEROGRÁFOS) (PANEL IZQUIERDO), 128 DISPOSITIVOS GNSS (PANEL CENTRAL) Y 297 INSTRUMENTOS DE MOVIMIENTO FUERTE DE TIERRA (PANEL DERECHO).

Una de las grandes novedades que incorpora esta Red Sísmológica Nacional, es la inclusión de estimación de desplazamiento en tiempo real. Esto se lleva a cabo utilizando tecnologías satelitales mediante 128 receptores GNSS de Trimble. Casi 100 de ellos ya están instalados y almacenando datos cada segundo. Cuarenta de estos dispositivos incluyen capacidades adicio-

nales RTX; estas capacidades consisten en estimar la posición del instrumento –con una repetibilidad de 4 cm- en tiempo real mediante un algoritmo denominado Precise Point Positioning (PPP) del proveedor que se ejecuta en el receptor incluyendo las correcciones de deriva de reloj y órbitas satelitales transmitidos mediante otro satélite (Omnistar).

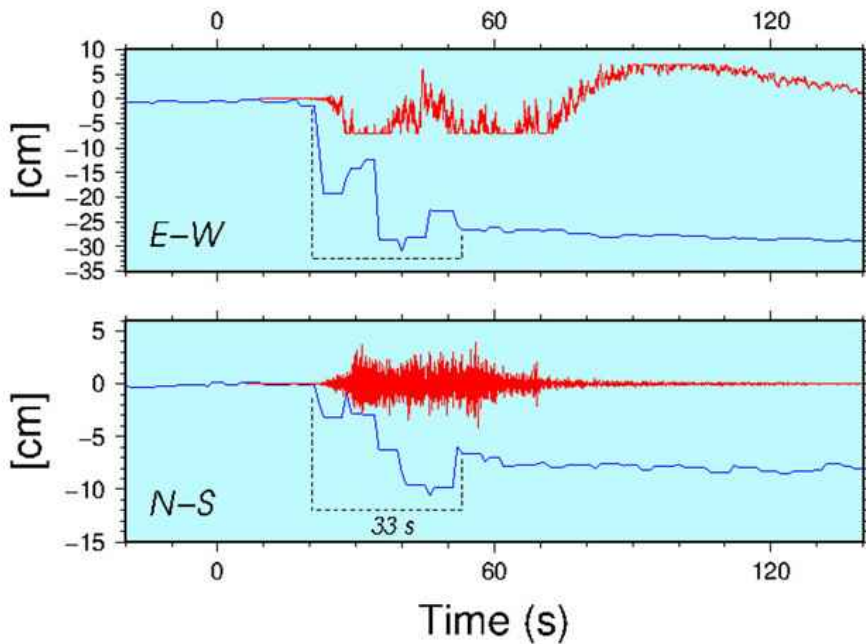


FIGURA 3. PRIMERA DETECCIÓN CO-SÍSMICA EN TIEMPO REAL DEL DESPLAZAMIENTO MEDIANTE LA METODOLOGÍA RTX DE UN DISPOSITIVO GNSS TRIMBLE. LOS CAMBIOS ESTÁTICOS EN LAS COMPONENTES ESTE Y NORTE, MUESTREADAS A 1 HZ, ALCANZAN LOS 30 Y 8 CM, RESPECTIVAMENTE. EN LA PARTE SUPERIOR DE LA COMPONENTE ESTE SE PUEDE OBSERVAR EL REGISTRO SATURADO DE VELOCIDAD DEL INSTRUMENTO DE BANDA ANCHA. DEL MISMO MODO, EN LA COMPONENTE NORTE-SUR SE PUEDE OBSERVAR EL REGISTRO DE ACELERACIÓN.

Las pruebas iniciales del sistema RTX, en abril de 2014, permitieron la captura del primer registro de desplazamiento en la superficie de la Tierra producida por un terremoto mediante esta técnica. El dispositivo RTX de Trimble se instaló en el aeropuerto de Iquique y permitió la detección y estimación en tiempo real del desplazamiento producido en ese lugar por la réplica principal del terremoto de Iquique ocurrida el 3 de abril de 2014.

Los registros muestran 30 cm de desplazamiento permanente al Oeste y 8 cm hacia el Sur, después de 33 segundos de la llegada de la onda P (Figura 3).

Suponiendo que el desplazamiento en la falla tiene lugar en la zona de acoplamiento entre placas, debido a la ubicación de la estación en relación a la zona de ruptura, es posible estimar la magnitud y -la ubicación del desplazamiento en la falla- con sólo un punto de observación. En

este caso, el desplazamiento estático (permanente) se alcanza 33 s después del arribo del primer impulso.

OBJETIVOS DE LA RED

Debido a que el sistema de observación sísmológica desarrollado por el CSN es el único sistema a nivel de país, son varios objetivos que se deben cumplir:

a) La red debe ser capaz de proporcionar suficiente información para caracterizar rápidamente aquellos grandes terremotos que afectan a Chile y proporcionar de manera rápida una estimación de su impacto, en particular para estimar niveles de aceleración alcanzados en la superficie de la Tierra (Shakemaps) y también para evaluar el potencial de

generación de tsunamis en el campo cercano. Esta no es una tarea sencilla debido a que terremotos de gran magnitud ($M > 7.5$) tienen lugar muy cerca de la red de observación (en el campo cercano) de modo que los sistemas basados en sismometría de banda ancha se saturan, mientras que la aceleración registrada, doblemente integrada, es a menudo inestable, ya que requiere de precisas correcciones a la línea base de referencia y estimaciones de rotaciones e inclinaciones del terreno (Kinoshita y Takagishi, 2011; Wang et al., 2011; Colombelli et al., 2013, Melgar et al-2013).

b) Un segundo objetivo es caracterizar -de la mejor manera posible- las zonas sísmicas que son responsables de la amenaza sísmica en Chile. La red debe tener la sensibilidad suficiente para detectar terremotos de magnitud 3 y superiores dentro del país. Se reconoce que los terremotos más pequeños podrían proporcionar una mejor definición de estas fuentes en períodos más breves, de modo que la red existente, con espaciamiento intersensor de unos 80-90 km, puede indicar regiones dónde concentrar los futuros esfuerzos con arreglos más densos, ya que si se desea disminuir el umbral de magnitud, es necesario incrementar el número de estaciones.

c) Recopilar antecedentes sobre aceleraciones del terreno asociadas a terremotos significativos. El hecho de establecer la manera de cómo varía la aceleración del suelo en función de la magnitud del evento, distancia a la ruptura sísmica, tipo de suelo, y otros parámetros como geometría y evolución de la ruptura, es de suma importancia el continuo mejoramiento de las relaciones de atenuación con el consecuente impacto en las normas de construcción sísmo-resistentes. La red de 297 acelerógrafos fue concebida para estos propósitos.

TERREMOTO DEL 16 DE SEPTIEMBRE DE 2015

Con el objeto de estimar localmente la distribución de desplazamiento en la falla asociada a grandes terremotos, las observaciones GNSS en tiempo real se han incorporado como parte integral de la red sismológica. En este sentido, los datos locales GNSS disponibles permitieron la estimación de la distribución preliminar de desplazamiento en la falla asociada al terremoto $M_w=8.4$ de Illapel, ocurrido el 16 de septiembre de 2015. Una primera estimación fue publicada solo 33 horas después de ocurrido el terremoto. Durante los días posteriores, más datos se incluyeron en el proceso de inversión y la solución final -muy parecida a la preliminar- presenta una concentración de desplazamiento frente a las costas de Canela Baja (Figura 4), en tanto que la magnitud de momento se estimó en 8,35. Una vez que las estaciones estén conectadas en tiempo real al Centro de Adquisición y Procesamiento de Datos, tarea que se está llevando a cabo durante el presente año, este intervalo se reducirá a algunos minutos.

Debido a que los desplazamientos en el campo cercano en la superficie de un semiespacio como consecuencia de una dislocación en su interior, decaen como r^{-4} , es extremadamente deseable que las estaciones GNSS estén situadas lo más cerca posible a la fuente. En el caso de Chile, la mayoría de las fuentes de los grandes terremotos que producen tsunamis de importancia, se encuentran ubicadas a lo largo de la zona de acoplamiento de la placas de Nazca y de Sudamérica, entre la fosa y la costa, lo que hace este método muy apropiado para la situación sismo-tectónica del país.

Las estaciones GNSS se están desplegando aproximadamente cada 40 km a lo largo de la costa. Esto permite una separación intersensorial

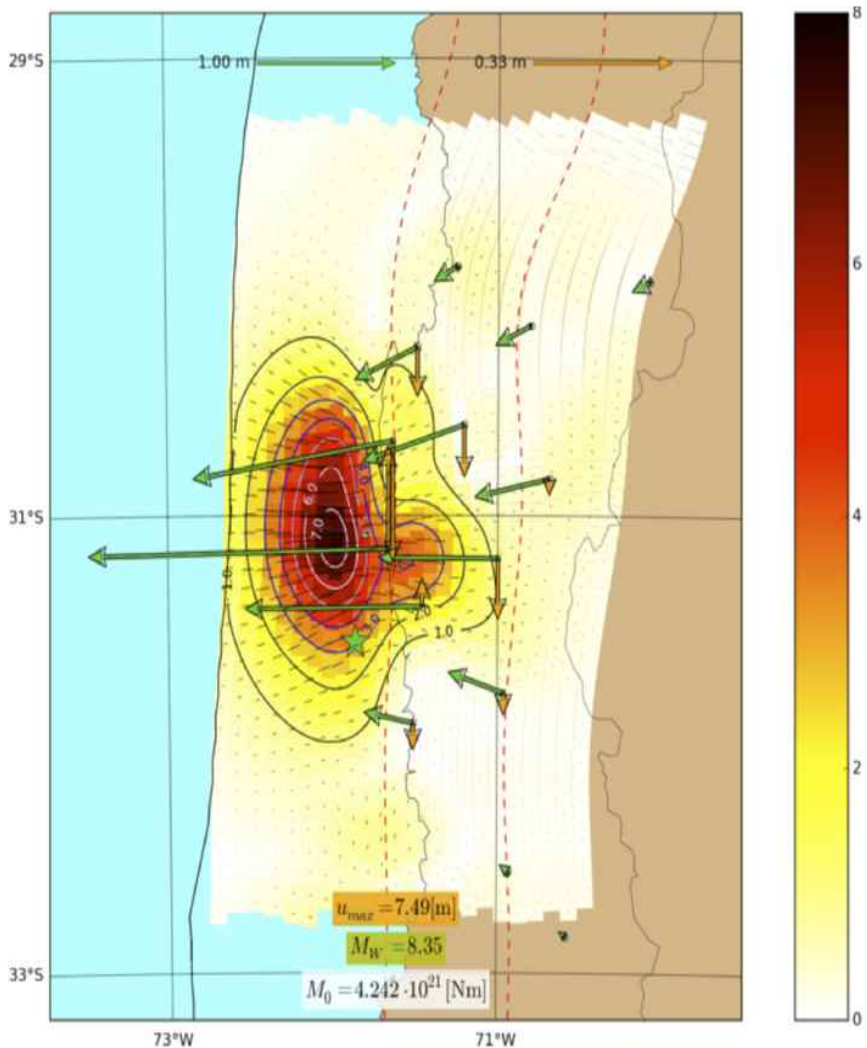


FIGURA 4.

FINAL (DERECHA) LA ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE DESPLAZAMIENTO EN LA FALLA DEL TERREMOTO DE 2015 OCURRIDO EN LA REGIÓN DE COQUIMBO A PARTIR DE DATOS DE DEFORMACIÓN OBSERVADOS EN LA SUPERFICIE (F. DEL CAMPO, COMUNICACIÓN PERSONAL). LA PRIMERA ESTIMACIÓN SE OBTUVO DESPUÉS DE 33 HORAS DE TIEMPO DE ORIGEN. EL OBJETIVO ES DISMINUIR ESTE NÚMERO A POCOS MINUTOS, AUN CONSIDERANDO LA DURACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TIEMPO EN LA FUENTE DE RUPTURA.

del mismo orden que la profundidad de la región sismogénica de estos grandes terremotos, esto es, 40 - 50 km. En el interior del país, esta separación entre estaciones es mayor, aprovechando los sistemas de comunicación de las estaciones de 6 componentes recientemente instaladas.

Además, como se ha planteado anteriormente, debido a que los sistemas GNSS utilizados para

medir el desplazamiento no se saturan, como ocurre con la observación de velocidad mediante sistemas de banda ancha, es posible emplear metodologías complementarias para caracterizar estos grandes terremotos. Riquelme et al. (enviado para su publicación, 2015) han desarrollado una técnica para estimar rápidamente, tanto la geometría de la falla así como la magnitud del sismo, mediante observaciones directas de des-

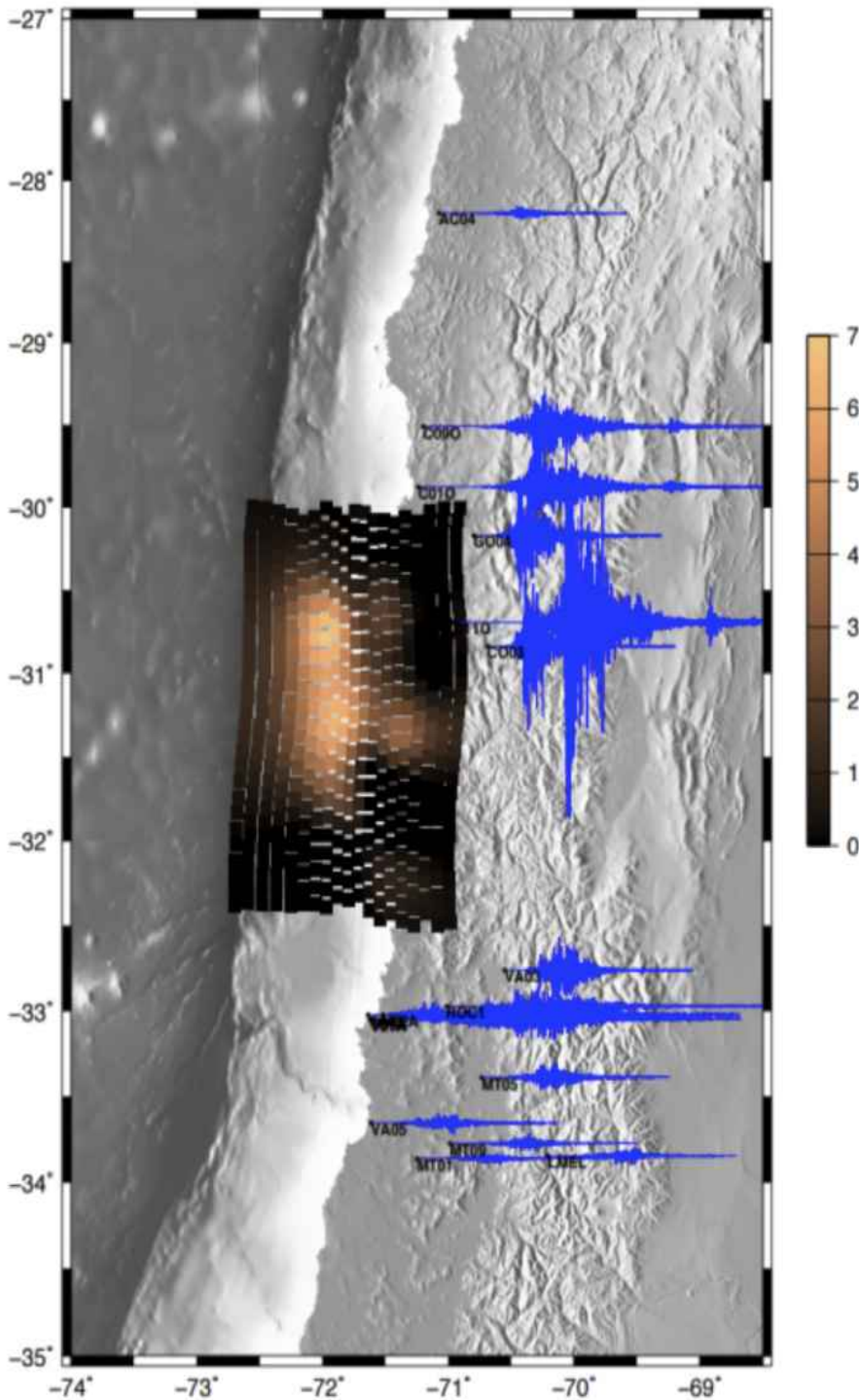


FIGURA 5.

REGISTROS DE MOVIMIENTO FUERTE (ACELEROGRAMAS) ASOCIADOS AL TERREMOTO $M_W = 8.4$ DE ILLAPEL DEL 16 DE SEPTIEMBRE. ACELERACIONES MÁXIMAS DEL ORDEN DE 60% G SE REGISTRARON EN LAS ESTACIONES DIRECTAMENTE HACIA EL INTERIOR DE LOS DESPLAZAMIENTOS MAYORES A LO LARGO DEL PLANO DE RUPTURA (MODELO SLAB1.0, HAYES ET AL., 2012).

plazamiento en el campo cercano a través de la metodología fase W. Los resultados iniciales de la aplicación de este método a los grandes terremotos chilenos como los de Maule, 2010; Iquique 2014 e Illapel 2015, muestran resultados prometedores para su establecimiento en modo operacional.

Otro avance significativo alcanzado en la implementación de la nueva Red, es la recolección de datos de movimiento fuerte y su rápida publicación. Estas estaciones no se encuentran conectadas al sistema de adquisición principal en tiempo real, de modo que los datos se recopilan poco tiempo después del sismo de interés (en general $M > 7$) y son publicados en: <http://evtdb.csn.uchile.cl/>.

A modo de ejemplo, la Figura 5, preparada por Leyton (comunicación personal), muestra los registros de movimiento fuerte del terremoto de Illapel, ocurrido en septiembre de 2015.

Registros de movimientos fuertes para otros terremotos importantes que han tenido en lugar en Chile desde mayo de 2010, también se pueden descargar de: <http://evtdb.csn.uchile.cl/>.

Se espera que durante los próximos meses, gran parte de los 297 instrumentos acelerográficos se conecten al centro de datos ubicado en Santiago, es decir puedan ser interrogados desde el Centro de Datos. Carabineros de Chile ha facilitado la instalación de gran parte de estos equipos en sus dependencias distribuidas a lo largo del país. También ha ofrecido la conectividad a dichas estaciones.

En la actualidad, se está implementando un sistema robusto de comunicaciones satelitales en una red base de 16 estaciones a lo largo del país. Adicionalmente, a mediados de 2016 el CSN debiese contar con un sistema central de adquisición de datos alternativo. ■

AGRADECIMIENTOS

LAS PROLIJAS Y MINUCIOSAS LECTURAS DE CATALINA CARO Y MARIO PARDO MEJORARON SIGNIFICATIVAMENTE LAS PRIMERAS VERSIONES DE ESTE DOCUMENTO.

REFERENCIAS

- Beck, S., S. Barrientos, E. Kausel and M. Reyes, Source characteristics of historic earthquakes along central Chile subduction zone (1998). *Jour. South Am., Earth Sciences* 11 (2) doi:10.12/S0895-9811(98)00005-4.
- Cisternas, M., B. Atwater, F. Torrejón, Sawai, Y., Machuca G., Lagos M., Eipert A., Youlton C., Salgado I., Kamataki T., Shishikura M., Rajendran C.P., Malik J.K., Rizal Y. and Husni M. Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake, *Nature*, 437, 404-407, 2005.
- Colombelli, S., R. Allen and A. Zollo, Application of real-time GPS to earthquake early warning in subduction and strike-slip environments, *J. Geophys. Res.* 118, 3448-3461, 2013.
- Hayes, G., Wald, D., Johnson, R., Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries, *J. Geophys. Res.* 117, B01302, doi:10.1029/2011JB008524, 2012.
- Kinoshita, S., and M. Takagishi, Generation and propagation of static displacement estimated using KiK-net recordings, *Earth Planets Space*, 63, 779–783, doi:10.5047/eps.2011.05.003, 2011.
- Melgar, D. S., Bock, Y., Sánchez, D. and Crowell, B. C. On robust and reliable automated baseline corrections for strong motion seismology, *J. Geophys. Res.*, 118, 1177-1187, doi:10.1002/jgrb.50135, 2013.
- Moernaut, J., M. Van Daele, K. Heirman, K. Fontijn, M. Strasser, M. Pino, R. Urrutia and M. De Batist, Lacustrine turbidites as a tool for quantitative earthquake reconstruction: New evidence for a variable rupture mode in south central Chile, *J. Geophys. Res.* 119, 3, 1607-1633, 2014.
- Riquelme, S., F. Bravo, D. Melgar, R. Benavente, J. Geng, S. Barrientos and J. Campos, W-phase source inversion using high-rate regional GPS data for large earthquakes, submitted. 2015.
- SISRA, Proyecto Sismicidad y Riesgo Sísmico en la Región Andina, CERESIS, 1985.
- Kanamori, H., The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.* 82, 20, 2981-2987, 1977.
- Wang, R., B. Schurr, C. Milkereit, Z. Shao, and M. Jin, An improved automatic scheme for empirical baseline correction of digital strong motion records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 101(5), 2029–2044, doi:10.1785/0120110039, 2011.