

INFORME TECNICO ACTUALIZADO 27 MAYO 2010

TERREMOTO CAUQUENES 27 FEBRERO 2010

SERVICIO SISMOLOGICO

Informe preparado por Sergio Barrientos

UNIVERSIDAD DE CHILE

Santiago, 27 de Mayo 2010

El gran terremoto, magnitud 8.8 (Mw), que ocurrió el 27 de Febrero a las 03:34 a.m. (hora local) en la zona central de Chile, se originó debido al desplazamiento súbito de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana en un área que se extiende aproximadamente desde la Península de Arauco por el sur hasta el norte de Pichilemu, cubriendo unos 450 km de longitud en dirección prácticamente norte-sur por un ancho de unos 150 km. Esta zona de contacto entre las placas, cuya expresión superficial es la fosa marina que se ubica unos 130 km de la costa hacia el Oeste, se localiza a lo largo del plano inclinado que define el área de fallamiento causante del terremoto.

Parámetros Hipocentrales

El hipocentro, o lugar donde se inicia la ruptura, se ubicó en las coordenadas geográficas $36^{\circ} 17' 23''$ S y $73^{\circ} 14' 20''$ W (hipocentro revisado) a una profundidad estimada de 30 km, tal como lo indica la Figura 1.

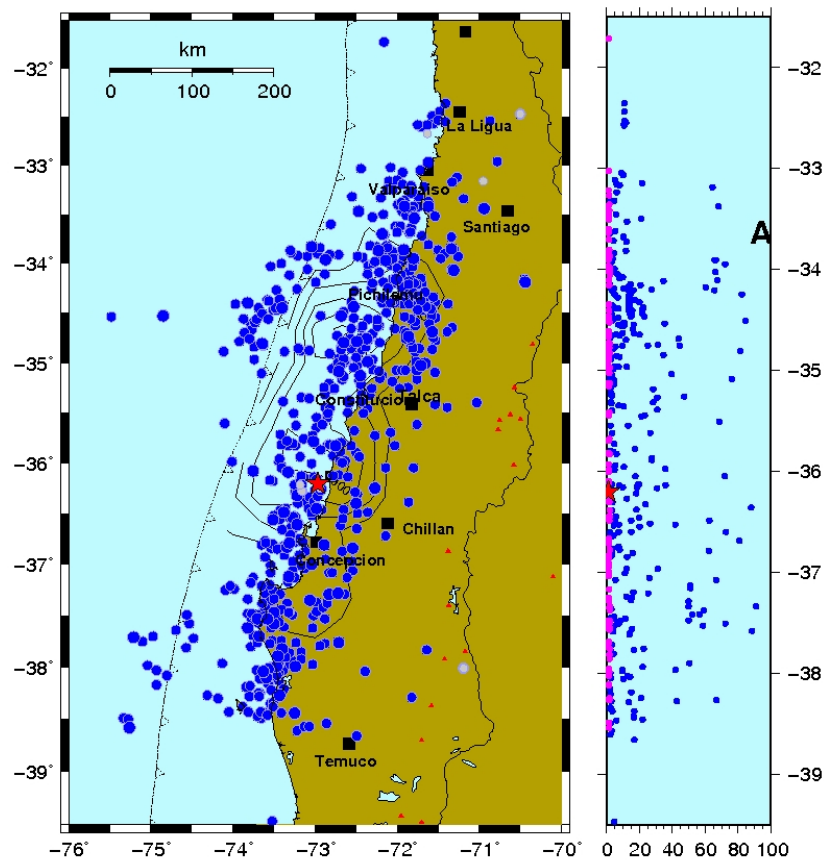


Fig. 1. Epicentro (estrella de color rojo), Réplicas con magnitud > 4.7 (color violeta las del primer día y azules las posteriores) y zona de ruptura asociada al terremoto del día 27 de Febrero de 2010 en la zona centro-sur de Chile. Las líneas de contorno en el panel izquierdo indican cantidad de desplazamiento en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana, alcanzando valores máximos del orden de 12-14 m (según el Centro Nacional de Información de Sismos del Servicio Geológico de EEUU, NEIC). El panel derecho muestra la actividad de réplicas determinadas por el NEIC en función del tiempo en días después del evento principal (día 1). El día 34 corresponde al 1 de Abril en tanto que el día 64 al 1 de Mayo del 2010.

El segmento del contacto entre la placa de Nazca y Sudamericana que se activó (zona de falla) y produjo el terremoto del 27 de Febrero alcanzó un área del orden de 450 km x 150 km con un desplazamiento superior a 10 m, tal como lo muestra la Fig. 1. Es usual que la ruptura no ocurra simultáneamente en toda la extensión de la falla, sino que ésta comience en un punto (hipocentro) y luego se propague a una velocidad del orden de 2.5 a 3.5 km/s. Estimaciones del tiempo que tomó la ruptura en propagarse a lo largo de toda la falla activada están en el orden de 110 s, tal como lo muestra la Fig. 2, preparada por L. Ruff (U. of Michigan).

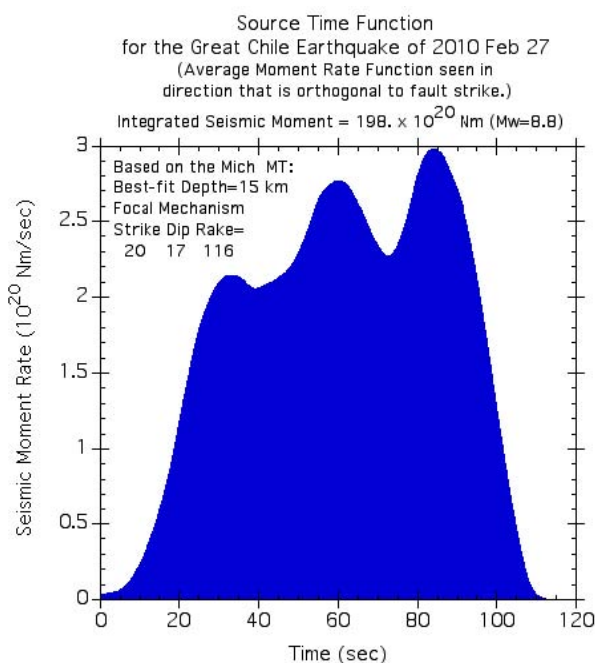


Fig. 2. La tasa de liberación de momento sísmico representa una medida de cómo se liberó la energía en la falla (tres pulsos siendo el siguiente mayor que el anterior) y su duración total es de 110 s.

Como antecedente adicional, las redes sismológicas globales que han registrado el sismo mayor han publicado los siguientes datos, en comparación con los que proporcionó el Servicio Sismológico de la Universidad de Chile. Cabe destacar que la determinación de la magnitud de las agencias internacionales se realiza a distancias telesísmicas (> 1000 km) en tanto que aquella estimada por el SSN utiliza datos locales.

Agencia	Tiempo Origen (UTC)	Latitud °S	Longitud °W	Profundidad (km)	Magnitud
NEIC (EE.UU.)	06:34:14	35.909	72.733	35	8.8
GEOFON (Alemania)	06:34:11.9	36.05	72.75	24	8.3
EMSC (Francia)	06:34:14.1	35.888	73.043	30	8.8
SSN (Chile)**	06: 34:08	36.29	73.239	30.1	8.8*

*Tiempo origen, hipocentro y magnitud revisadas.

** Involuntariamente se publicó desde el 31/05/2010 hasta el 08/06/2010 el epicentro con error en la coordenada longitudinal. Fue corregido de 72.239 (erróneo) a 73.239 (correcto).

Réplicas

Luego de la ocurrencia de cualquier sismo en la zona de subducción, es de esperar que ocurran réplicas, aunque sean detectadas solamente de manera instrumental. Es un proceso natural ya que el campo de tensiones internas en las placas así como en la zona de contacto se ha alterado considerablemente luego de la ocurrencia del evento mayor. Las réplicas ocurren principalmente en la zona que ha sido fracturada como también en los extremos de la zona de ruptura, en este caso tanto el extremo norte (V Región) como el extremo sur (VIII Región). Las réplicas posiblemente continuarán por varios meses más y su magnitud debiese disminuir al igual que su frecuencia; sin embargo, no es posible descartar la ocurrencia de réplicas de magnitud significativa.

Es necesario destacar que las probabilidades de ocurrencia de un evento de las mismas características, es decir, la activación de la falla que genere un terremoto de magnitud 8.8 en la misma región, son muy bajas. Estimaciones preliminares de desplazamiento ocurridas en la falla alcanzan a valores del orden de 10 a 12 m. Para permitir desplazamientos de este orden en el futuro, es necesaria la acumulación de energía elástica durante decenas de años, ya que la tasa de convergencia es del orden de 6.7 cm/año.

La Fig. 3 muestra cómo las réplicas de magnitud 4.8 o superior, se distribuyen durante los primeros dos meses después de ocurrido el terremoto, tanto en magnitud como en número de eventos por día. Nótese el gran número de réplicas con magnitud mayor que 4.7 acontecidas durante los primeros tres días de la secuencia. Durante los primeros tres meses de ocurrido el evento se han registrado más de 283 réplicas con magnitud superior a 5.0 y 22 con magnitud igual o superior a 6.0. Se han registrado varios miles de réplicas de menor magnitud, en general no sentidas por la población. No han ocurrido a la fecha réplicas de magnitud 7.0 o superior. Datos de magnitudes proporcionados por el Centro Nacional de Información Sísmica (NEIC) del Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS).

Debido a problemas de energía y comunicaciones ocasionados por el terremoto, el Servicio Sismológico de la Universidad de Chile pudo realizar tareas de mantenimiento y regularizar el funcionamiento de las estaciones sismológicas dispuestas en la región solamente diez días después de ocurrido el evento principal. Estas circunstancias se reflejan en el menor número de réplicas localizadas durante la primera semana, las cuales se muestran en la Figura 4. El panel superior de la misma figura muestra el umbral de detección en magnitud, en este caso es alrededor de 2.5. El número de eventos por día localizados por el SSN, que utiliza datos de la red local y que se muestra en el panel inferior, es mayor que aquel reportado por el NEIC. Esto se debe al hecho que una red local permite una mayor detectabilidad ya que los eventos sísmicos se encuentran más cercanos a las estaciones.

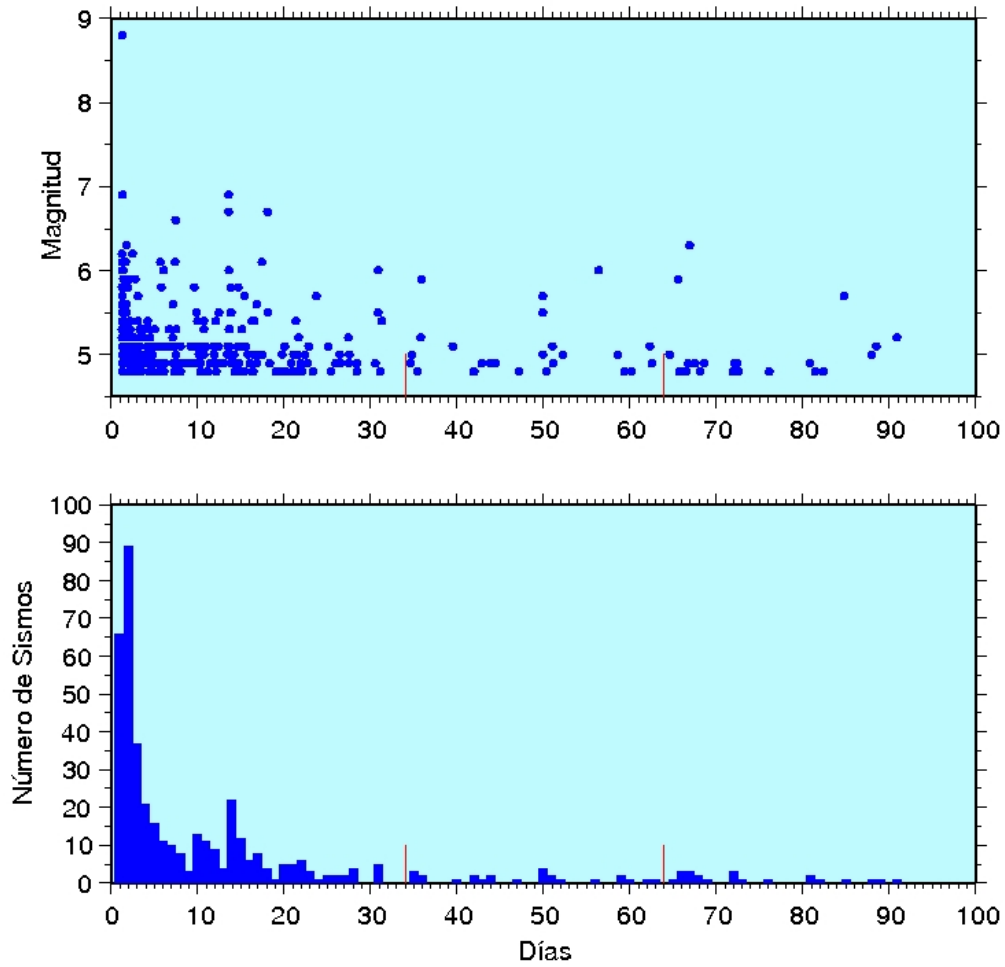


Fig. 3. Distribución temporal de las réplicas en función de su magnitud (solamente aquellos eventos con magnitud superior a 4.7; panel superior) y el número de sismos por día que se han registrado hasta tres meses después de la ocurrencia del evento principal (hasta el día 27 de Mayo). Datos de magnitudes proporcionados por el Central Nacional de Información Sísmica (NEIC) del Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS).

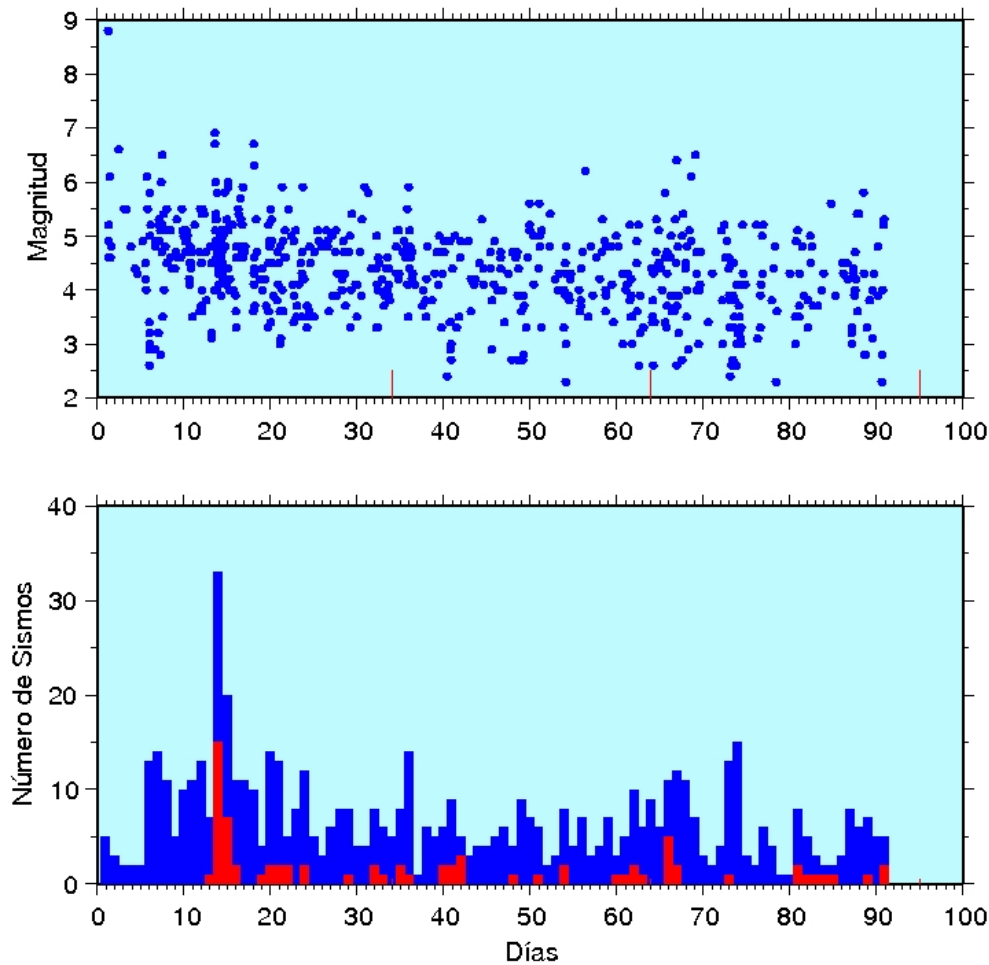


Fig. 4. Distribución temporal de las réplicas sensibles en función de su magnitud a partir de los datos registrados por el Servicio Sismológico de la Universidad de Chile (barras azules). El menor número de réplicas registradas durante los primeros días después de ocurrido el terremoto, comparada con el gráfico anterior, se debe al funcionamiento parcial de las estaciones en las áreas aledañas a la zona de ruptura, situación que se regulariza al cabo de la primera semana. Las barras rojas muestran las réplicas en el sector de Pichilemu. Se puede apreciar que el umbral de detección de sismos con magnitudes de hasta 2.1 es posible con la red local. La red local permite reportar todos aquellos eventos sensibles en la región afectada por el terremoto; esto no es posible si se cuenta solamente con información a partir de una red global.

Situación de la zona aledaña a Pichilemu

El día 11 de Marzo a las 11:55 (hora local) ocurrió un sismo $M=6.9$ en las cercanías de Pichilemu. Esta réplica ha sido una de las más grandes de la secuencia registrada hasta el momento. El evento, localizado preliminarmente en coordenadas geográficas 34.301°S y 72.13°W a una profundidad superficial, no ocurre a lo largo del plano de contacto entre las placas de Nazca y Sudamérica, plano en que se activó la falla que originó el terremoto del 27 de Febrero, sino que se localiza al interior de la placa cabalgante, es decir, la placa Sudamericana. El sismo del 11 de Marzo, que se puede considerar como una réplica -ya que lo más probable es que no hubiese ocurrido si no se activa previamente la falla asociada

al evento del 27 de Febrero- responde a un campo de esfuerzos de tipo extensional, produciendo una falla de tipo normal (similar a un bloque de la falla que cae por gravedad, Fig. 5)

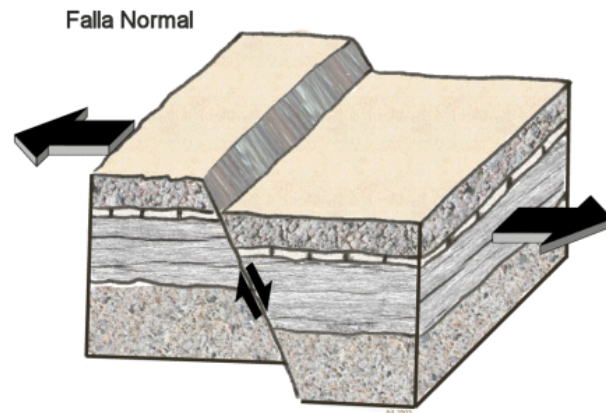


Fig. 5. Esquema de una falla normal en un ambiente de extensión, de modo que un bloque se desliza ("cae") por la acción de la gravedad. Las flechas horizontales indican extensión.

La Fig. 6 muestra la ubicación de los eventos superficiales junto a la orientación de los ejes a lo largo de los cuales este fallamiento habría ocurrido, se trata de un plano orientado aproximadamente en dirección N35W, es decir una falla del orden de 40 km de longitud por unos 20 km de ancho con un desplazamiento del orden de 1 a 1.5 m, lo que corresponde a un momento sísmico del orden de 2.5×10^{26} dina-cm.

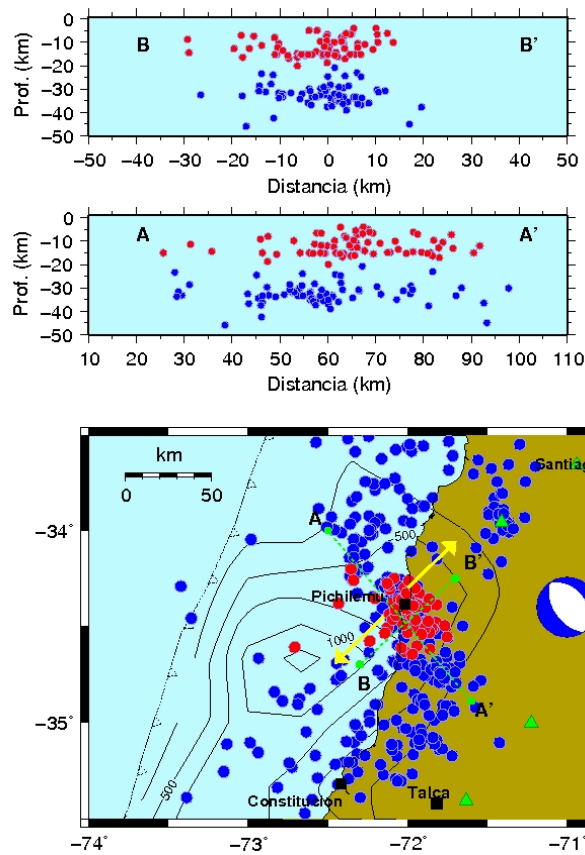


Fig. 6 Ubicación de la actividad sísmica en la zona aledaña a Pichilemu (epicentros color rojo). De acuerdo al mecanismo focal (círculo con sectores blanco y azul) esta falla tendría una orientación N147°E, con un manteo de 53° hacia el SW y un ángulo de deslizamiento de 88° (Solución entregada por Harvard Moment Tensor Project y la solución InSAR proporcionada por T. Ozawa, comunicación escrita), falla que responde al campo tensional indicado por la flecha amarillas. Los perfiles muestran que esta sismicidad se localiza en dos niveles de profundidad, superficiales (profundidades focales < 20 km, representados por color rojo) en el interior de la placa Sudamericana y aquellos que se ubican en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamérica, a profundidades > 30 km, círculos de color azul.

El mapa geológico producido por el Servicio Nacional de Geología y Minería muestra en esta zona varias fallas con una orientación muy similar a aquella mostrada por el mecanismo focal -y también con la orientación de la zona de réplicas- desde el NW hacia el SE.

Aceleraciones

El Servicio Sismológico cuenta con un variado número de instrumentos para registrar las aceleraciones producidas por los eventos sísmicos acaecidos en el país. Para este terremoto, las aceleraciones preliminares (sin corrección) registradas fueron las siguientes:

Red Sismológica Nacional

Localidad	Aceleración Máx. Horizontal NS	Aceleración Máx. Horizontal EW	Aceleración Máx. Vertical
Colegio San Pedro, Concepción	0.65 g	0.61 g	0.58 g
Cerro Calán, Santiago	0.20 g	0.23 g	0.11 g
Campus Antumapu, Santiago	0.23 g	0.27 g	0.17 g
Cerro El Roble	0.19 g	0.13 g	0.11 g
Melipilla	0.57 g	0.78 g	0.39 g
Olmué	0.35 g	0.25 g	0.15 g
Casablanca	0.29 g	0.33 g	0.23 g
San José de Maipo	0.47 g	0.48 g	0.24 g
Colegio Las Américas	0.31 g	0.23 g	0.16 g
Cerro Santa Lucia	0.24 g	0.34 g	0.24 g

Esta tabla se actualizará a medida que se obtengan nuevos datos de aceleración. Los registros digitales de aceleración generados como consecuencia del evento del 27 de Febrero se encuentran accesibles en este mismo portal www.sismologia.cl

También la Red de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (www.renadic.cl) ha reportado hasta el 5 de Abril valores extremos (sin corrección) de aceleraciones máximas horizontales y verticales.

RENADIC

Localidad	Aceleración Máx. Horizontal	Aceleración Máx. Vertical
Depto. Ing. Civil, U. de Chile	0.17 g	0.14 g
Estación Metro Mirador	0.24 g	0.13 g
CRS Maipú, R.M.	0.56 g	0.24 g
Hospital Tisné, R.M.	0.30 g	0.28 g
Hospital Sótero del Río R.M.	0.27 g	0.13 g
Hospital de Curicó	0.47 g	0.20 g
Hospital de Valdivia	0.14 g	0.05 g
Viña del Mar (Marga Marga)	0.35 g	0.26 g
Viña del Mar (Centro)	0.33 g	0.19 g

Antecedentes

El contexto geodinámico de Sudamérica se representa adecuadamente en la Figura 7. La velocidad de convergencias entre las placas de Nazca y Sudamericana frente a Chile varía entre 6.5 a 7 cm/año. Estas velocidades han sido determinadas con precisión geodésica mediante observaciones de GPS (Sistema de Posicionamiento Global) en las islas ubicadas sobre la placa de Nazca y sitios estables en Sudamérica, principalmente en localidades cerca de la costa Atlántica en Argentina y Brasil. Dicha convergencia es responsable de la ocurrencia de los grandes terremotos de subducción en Chile. Hacia el sur de la placa de Nazca (Península de Taitao, donde se encuentra el punto triple), es la placa Antártica la que penetra bajo la placa Sudamericana.

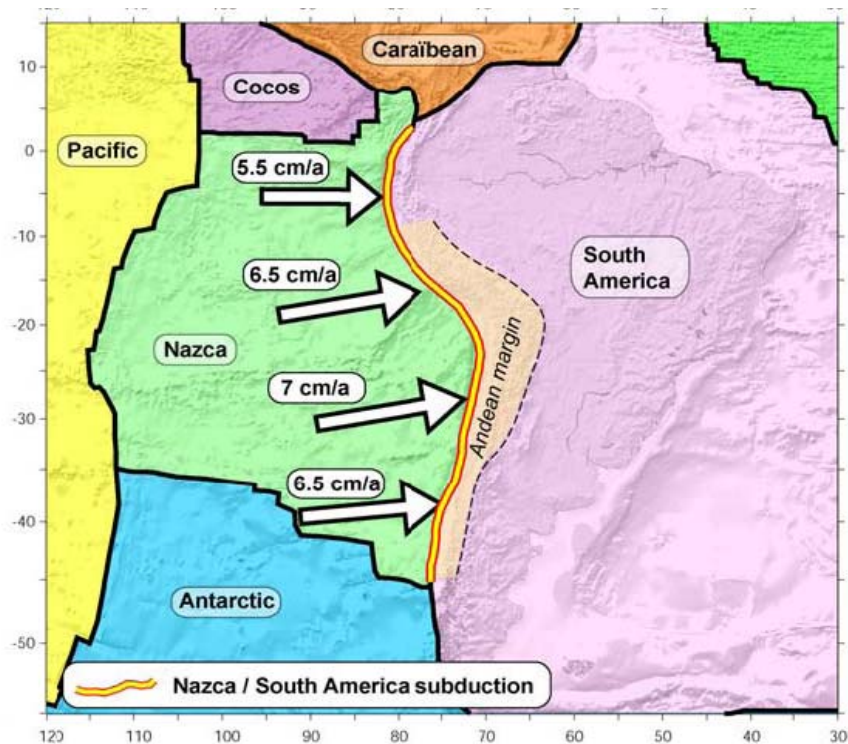


Fig. 7. Contexto tectónico Convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana (Vigny, 2003)

Si se mide la distancia entre alguna isla ubicada en la placa de Nazca, como Isla de Pascua, Isla Juan Fernández o Isla San Félix, en relación a un lugar en la zona estable del continente tal como Buenos Aires o algún lugar de Brasil, ésta disminuirá con el paso del tiempo a razón de la tasa de convergencia, es decir unos 6.5 a 7 cm cada año. Sin embargo, en la región de contacto entre ambas placas (Nazca y Sudamérica) no existe desplazamiento relativo, ambas placas se encuentran trabadas (Fig.8). Como la convergencia sigue su curso, a una tasa regular y constante, las placas comienzan a deformarse elásticamente en las cercanías de la zona de contacto tal como lo muestra la Fig. 8.

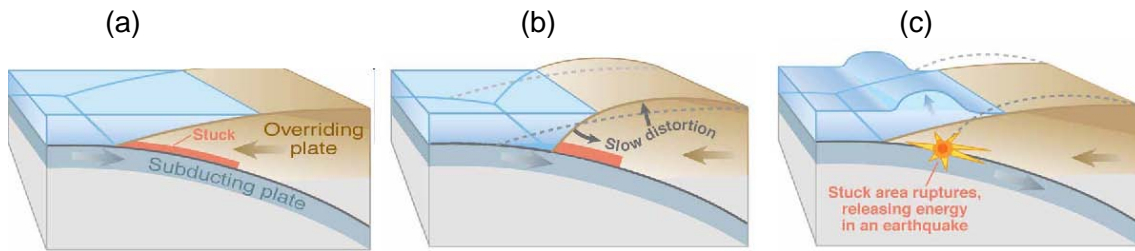


Fig. 8. Esquema que muestra la preparación y ruptura de la zona de contacto entre las placas de Nazca (subductante) y Sudamericana (cabalgante). En la zona de contacto, mostrada por la línea roja en las figuras (a) y (b), ambas placas no permiten el desplazamiento regular y permanente de manera que ambas placas se deforman, especialmente la cabalgante, dando origen a un sismo una vez que la energía elástica no puede seguir acumulándose.

La deformación elástica de ambas placas continúa acumulándose hasta llegar a su límite activándose la falla en el contacto y generándose el terremoto, lo que permite que finalmente la placa de Nazca penetre bajo la placa Sudamericana recuperando parte de su posición previa al inicio del actual ciclo sísmico, es decir se mueva violentamente en un par de minutos hacia el Oeste a lo largo de la zona de contacto con desplazamientos del orden de 10 a 12 m. Puntualmente estos valores de desplazamiento pueden ser aún mayores.

Deformación de la Corteza

Se han reportado desplazamientos verticales y horizontales de la costa y puntos de GPS (Global Positioning System) al interior del continente. Levantamientos del orden de 1.9 m a 2.0 m se han estimado para Punta Lavapié (ver Fig. 9); también se han reportado levantamientos de 1.1 m inmediatamente al sur de Concepción (Bataille, comunicación verbal).



Fig.9. Panel derecho, levantamiento en Punta Lavapié (Península de Arauco). El alga coralina Lithothamnium al quedar fuera del ambiente que le permite su sobrevivencia en el intermareal, pierde su coloración quedando blanca (panel izquierdo), de modo que se transforma en un extraordinario marcador natural de alzamiento costero. Fotografías de S. Barrientos, 18 de Abril, 2010.

Desde la perspectiva GPS, se ha publicado el siguiente mapa (http://www.unavco.org/research_science/science_highlights/2010/M8.8-Chile.html) con diferencia de posición de algunos puntos medidos con anterioridad y posterioridad al terremoto, principalmente aportado por el Proyecto CAP (un consorcio de instituciones y universidades liderado por M. Bevis, Universidad de Ohio).

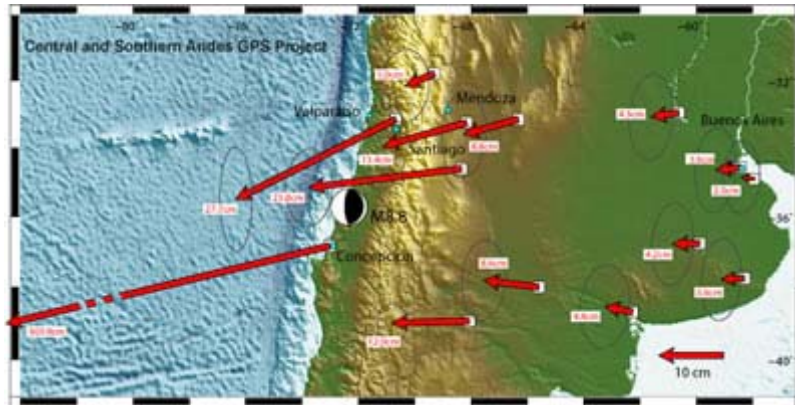


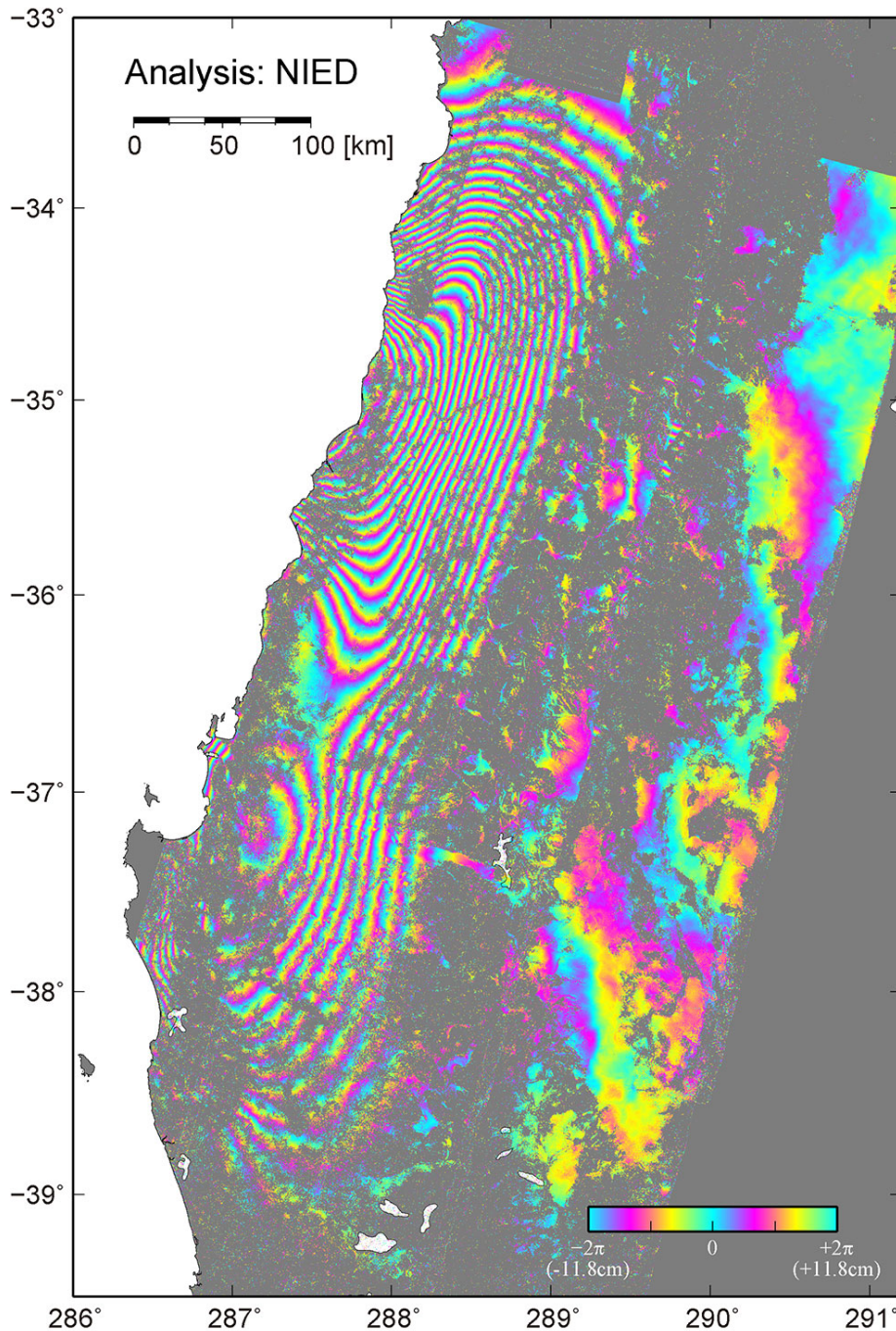
Fig. 10. Desplazamientos co-sísmicos observados como resultado de la activación de la falla en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana. El máximo desplazamiento horizontal en esta figura alcanza a 3.7 m en la ciudad de Concepción (Proyecto CAP, Bevis et al). Para la ciudad de Constitución, C. Vigny (comunicación personal) reporta 4.7 m de desplazamiento horizontal.

Desde la ocurrencia del terremoto y hasta el 9 de Marzo posterior, se han registrado alrededor de 50 cm de desplazamiento post-sísmico en la ciudad de Concepción, de acuerdo a la información publicada en la página http://www.unavco.org/research_science/science_highlights/2010/M8.8-Chile.html Todos estos desplazamientos, incluyendo el alzamiento de la costa, son generalmente consistentes con la ruptura a lo largo del contacto entre ambas placas.

Otro elemento importantísimo, que se ha sumado al sistema GPS para determinar cambios topográficos en la zona directamente afectada por el terremoto, ha sido el advenimiento de la tecnología de interferometría de radar (InSAR). Esta tecnología se basa en la determinación de la intensidad y fase de las señales radáricas reflejadas en la superficie de la Tierra. La intensidad conlleva información sobre el tipo de material sobre el cual la señal se refleja y cambios en la fase revelan posibles cambios de distancia en la trayectoria de la señal. Los cambios de elevación del terreno producen diferencias en la fase recepcionada de modo que al adquirir imágenes en la banda de ondas de radar en ocasiones diferentes, se logra establecer los cambios que se han producido a lo largo de la línea de vista entre el terreno y el satélite. Diferentes dispositivos alojados en el satélite utilizan diferente longitudes de onda de modo que cada franja coloreada (paso de un color al mismo, luego de transitar por todo el espectro) representa un cambio en distancia de una longitud de onda, la cual puede tomar valores de 11.8 cm, como es el caso de la Fig.11, u otros. La Fig. 11 fue preparada por T. Ozawa, del National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) ubicado en Tsukuba, Japón.

PALSAR ScanSAR-ScanSAR interferometry

Path:422, Master: 2008/4/10, Slave:2010/3/1



PALSAR level 1.0 data are shared among PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface), and provided from JAXA under a cooperative research contract with ERI, Univ, Tokyo. The ownership of PALSAR data belongs to METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) and JAXA.

Fig. 11. Interferograma que revela la deformación (principalmente vertical) de la corteza asociada a la falla que se activó el 27 de Febrero de 2010. Cada franja –paso al mismo color– indica una diferencia de 11.8 cm a lo largo de la línea de vista entre el satélite y el terreno. Dos zonas principales de deformación –una ubicada un poco la sur de Concepción y la otra ubicada mar afuera frente a Constitución– son responsables de la deformación observada. Una tercera región de liberación de energía, aunque no tan significativa como las anteriores, se ubica costa afuera a la latitud de 36.5°S.

La imagen en la banda de ondas de radar (Fig. 11) muestra principalmente la concentración de contornos que en su mayor parte corresponden a subsidencia o hundimiento a lo largo de dos zonas: a) una zona frente a Constitución, que es de mayor amplitud en la fuente dada la concentración de curvas de nivel y, b) otra que se encuentra ubicada en la latitud del Golfo de Arauco. Son éstas las zonas donde se ha concentrado la liberación de energía durante este terremoto

Estudios post-terremoto

El Servicio Sismológico conjuntamente con académicos del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile se encuentra desplegando una red de observación post-terremoto conjuntamente con varias instituciones internacionales: el GeoForschung Zentrum de Potsdam (GFZ), Alemania, el Instituto de Física del Globo de París (IPGP), la Escuela Normal Superior (ENS), Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS), United States Geological Survey (USGS), California Institute of Technology, Liverpool University, Cambridge University y otros.

Este esfuerzo multinacional ha permitido establecer cerca de 140 estaciones sismológicas (Fig. 12) a lo largo de la zona de ruptura con el objeto de estudiar las réplicas que han ocurrido y seguirán ocurriendo en esta zona.

Estos datos permitirán conocer de mejor manera los procesos físicos involucrados en la subducción de una placa oceánica (Nazca) bajo una continental (Sudamérica), caracterizar la distribución de esfuerzos y deformación y los terremotos asociados, mejorando de esta manera nuestro conocimiento sobre zonas sismogénicas, modelos de peligro sísmico y, por consecuencia, normas de diseño sismo-resistente

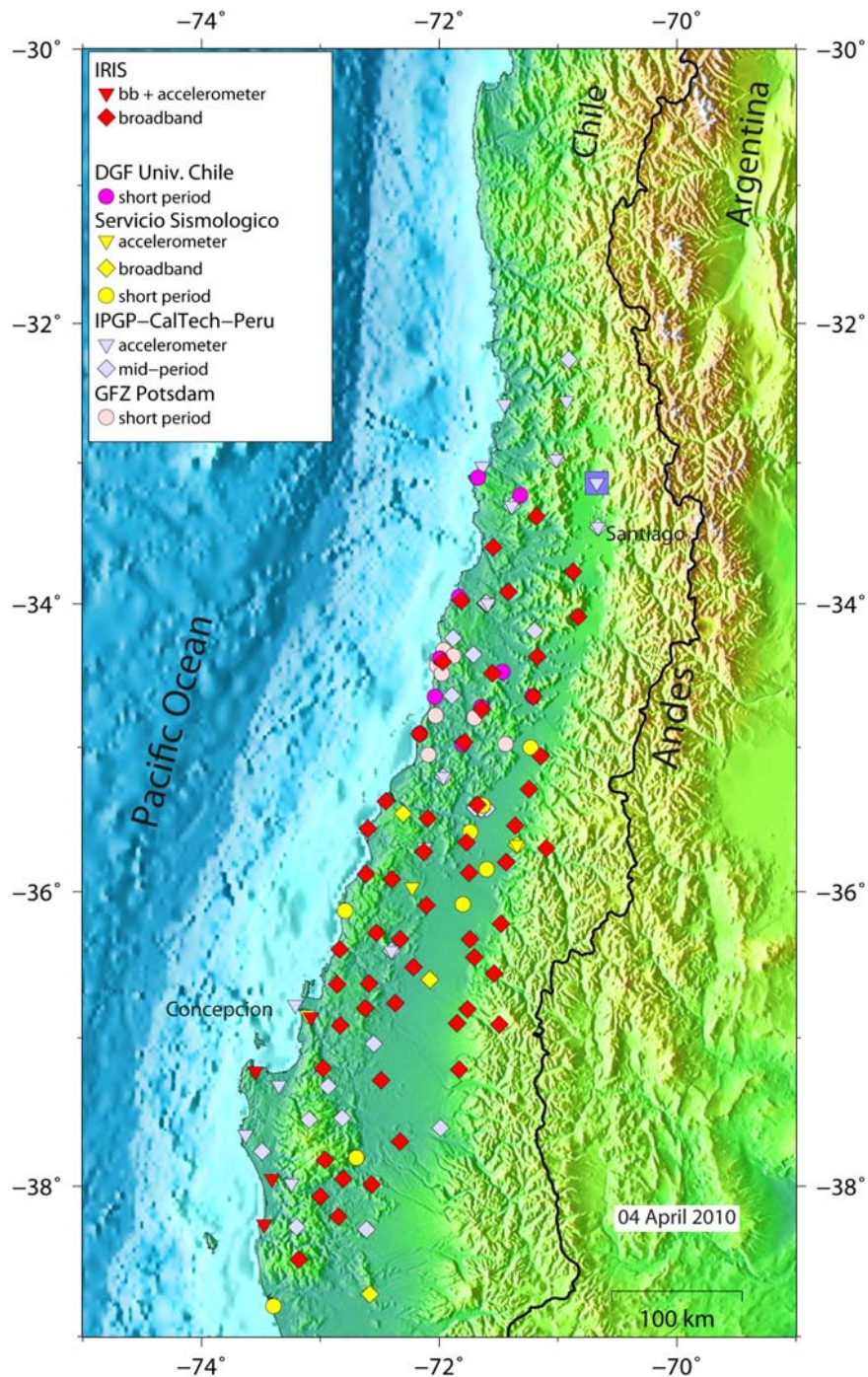
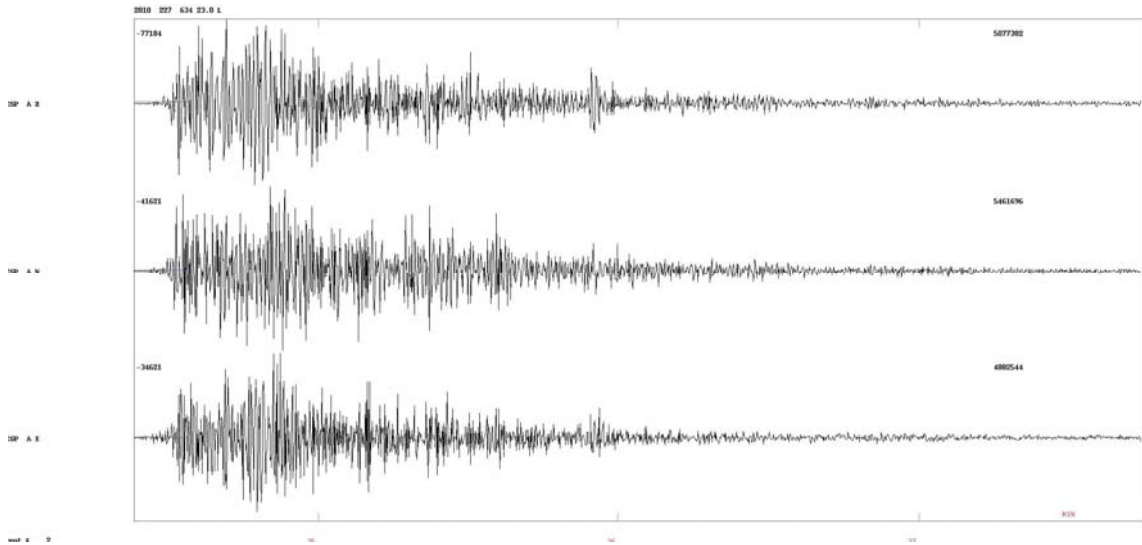


Fig. 12. Ubicación de las estaciones sismológicas establecidas en la región después del terremoto del 27 d Febrero. Instituciones de Alemania, Gran Bretaña, Francia y Estados Unidos han colaborado con equipo sismológico el cual ha sido instalado en la zona.

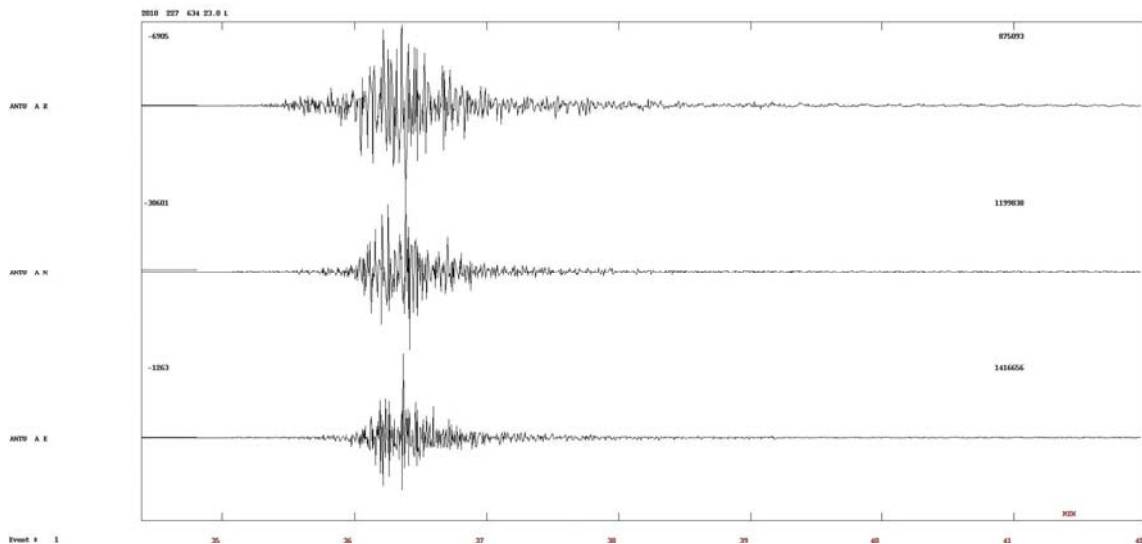
ANEXO I

Acelerogramas

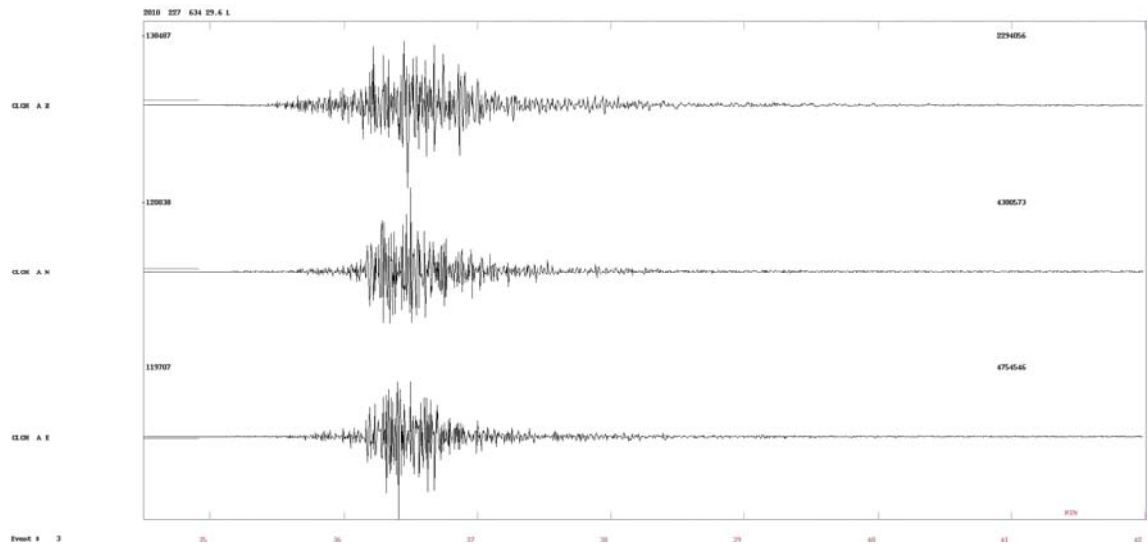
Estación Colegio San Pedro, Concepción



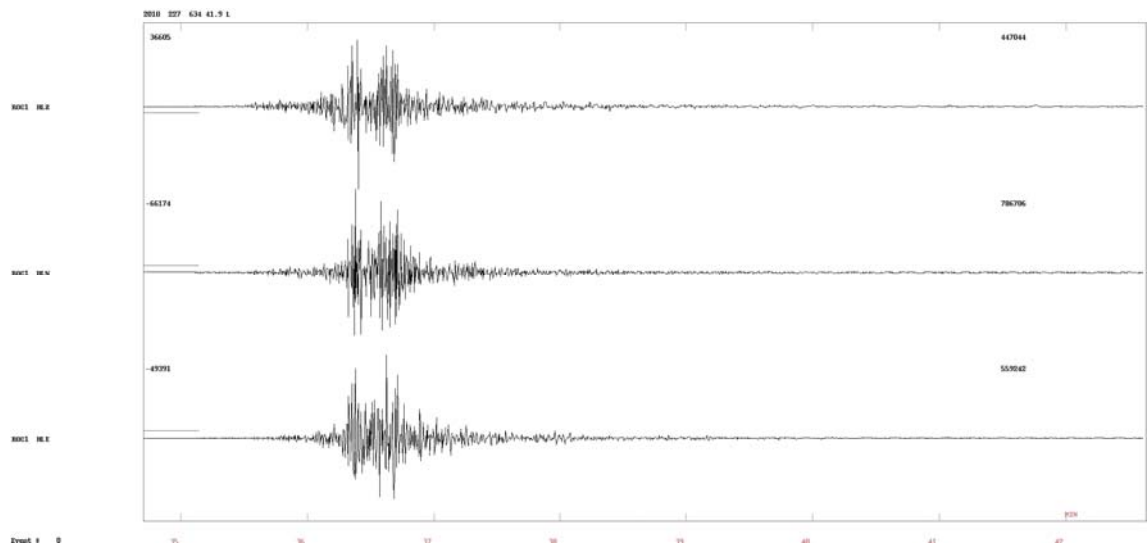
Estación Campus Antumapu, Santiago



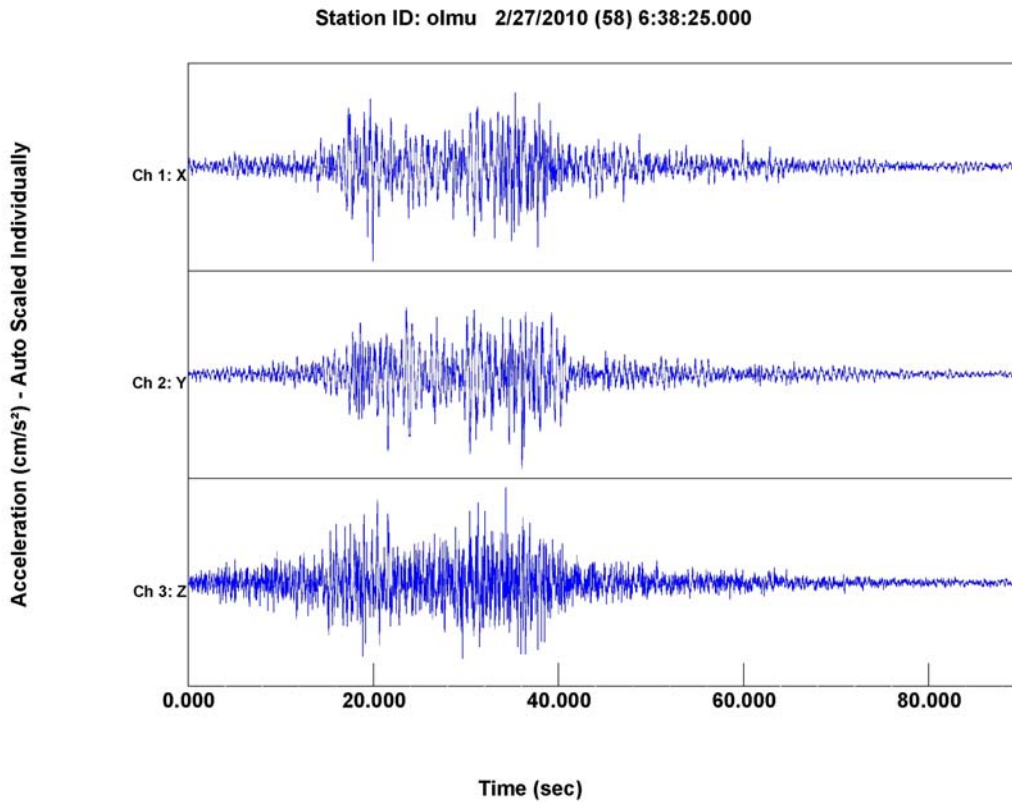
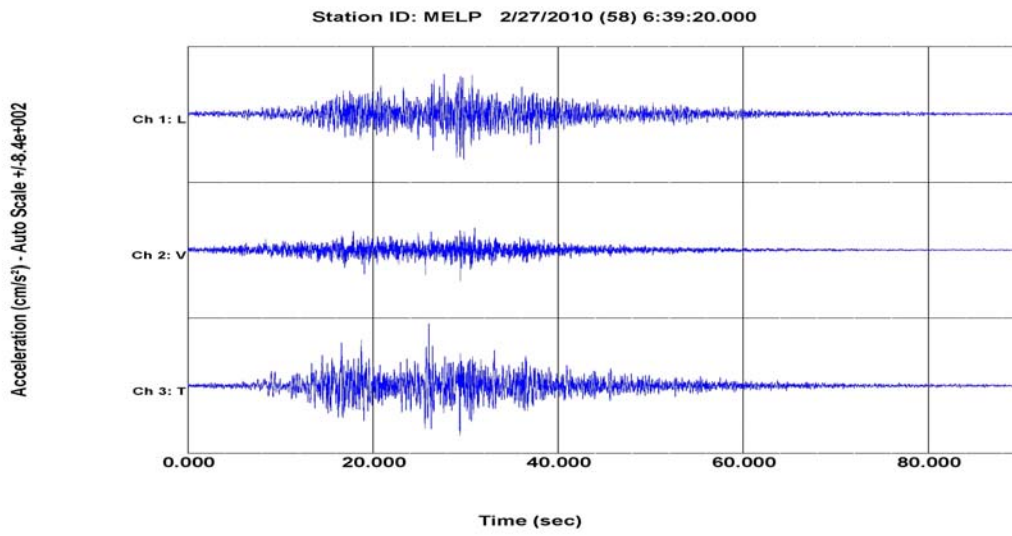
Estación Cerro Calán, Santiago



Estación Cerro El Roble, Til Til.

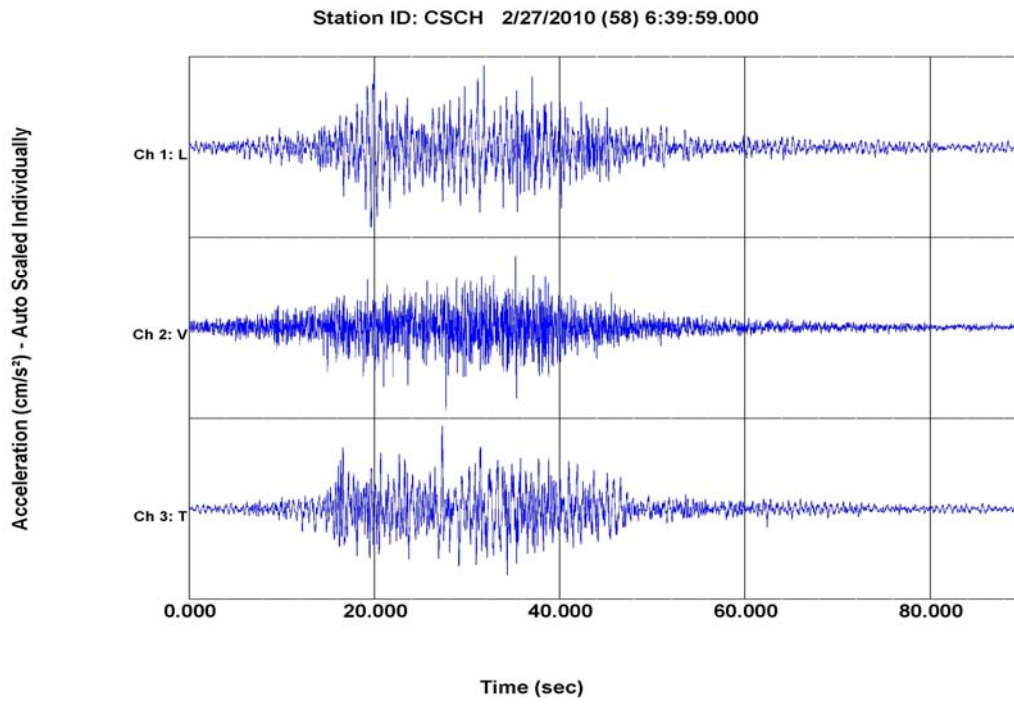


Estación Melipilla, Melipilla.

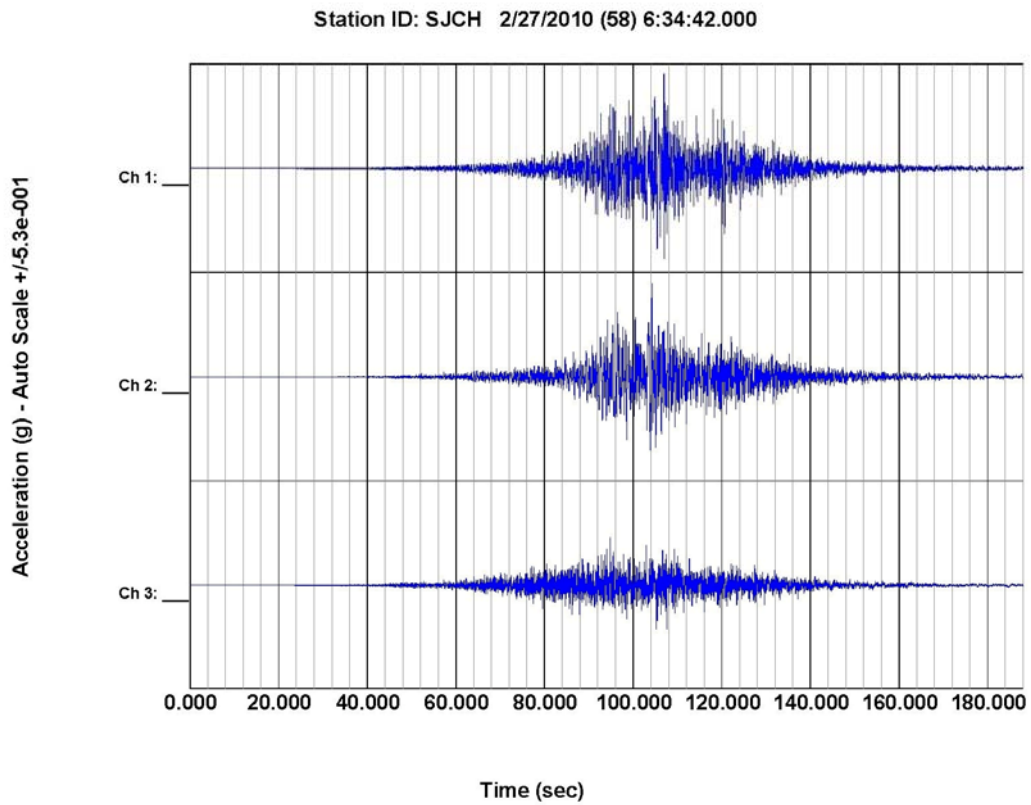


Estación Olmué, Olmué

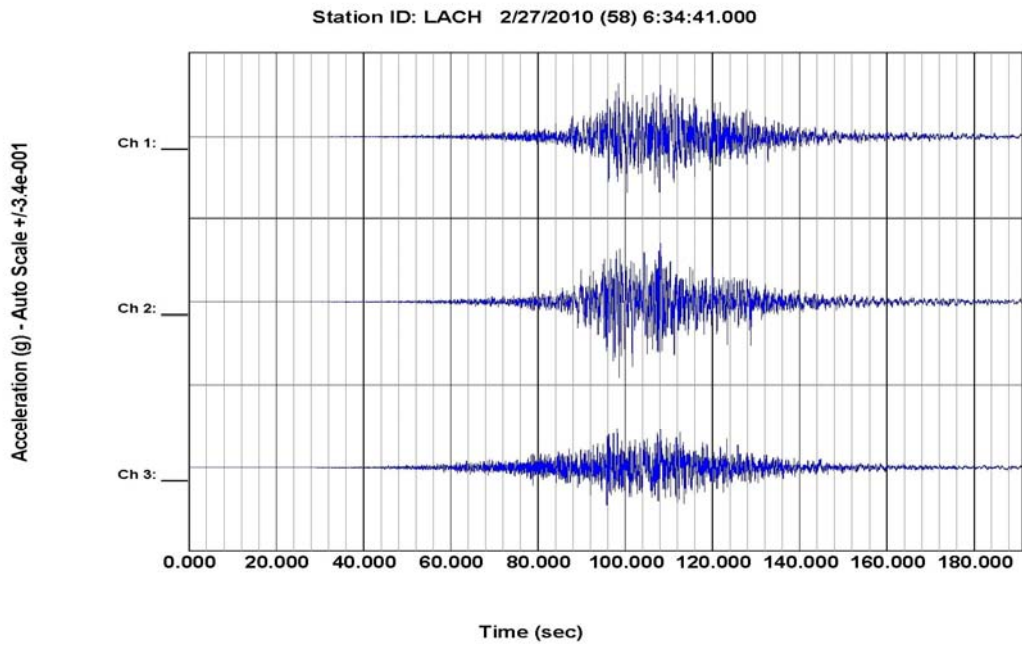
Estación Casablanca



Estación San José de Maipo



Estación Colegio Las Américas, Santiago



Estación Santa Lucía, Santiago.

