

Informe Técnico

Terremoto de Iquique, Mw=8.2

1 de abril de 2014

**CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL
UNIVERSIDAD DE CHILE**

Informe preparado por Sergio Barrientos

Abril 2014

Terremoto de Iquique, Mw=8.2

1 de abril de 2014

El día martes 1 de abril de 2014 a las 20:46:45, hora local, ocurre un sismo de magnitud Mw=8.2 con epicentro localizado, según el Centro Sismológico Nacional, frente a las costas de Iquique y Pisagua, en el norte de Chile, con coordenadas geográficas 19.572°S y 70.908°W y con profundidad hipocentral de 38.9 km. Este terremoto es el mayor registrado en Chile desde el 27 de febrero de 2010 y el tercero mayor desde el 22 de mayo de 1960. Gran actividad precursora ocurrió en la zona epicentral, destacándose aquella ocurrida el 16 de marzo (15 días antes) con un sismo de magnitud 6.7 como también actividad sísmica en los períodos de enero de 2014 y julio-agosto de 2013. La réplica principal, de magnitud 7.6, se ubica inmediatamente hacia el sur de la zona de ruptura asociada al terremoto del 1 de abril. Los mecanismos de foco del sismo principal y sus réplicas más importantes son consistentes con el desplazamiento de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.

Aunque la hipótesis de la estimación de probabilidades de ocurrencia de sismos mayores basada en las secuencias de sismos mayores ocurridos con anterioridad, denominadas lagunas sísmicas (McCann et al., 1979) ha sido fuertemente cuestionada (Kagan y Jackson, 1991), Comte y Pardo (1991) y Giovanni et al (2002) clasifican la zona sur de Perú y norte de Chile como una laguna sísmica desde una perspectiva más general en la que no se habían registrado sismos de gran magnitud por más de 100 años.

Modelos iniciales de desplazamiento en la zona de acoplamiento asociados a este terremoto indican valores de 5 a 7 m de deslizamiento máximo local. La distribución de las réplicas tempranas, indican una zona de ruptura del orden de 150 km. Observaciones de deformación de la corteza mediante instrumentos GPS (Global Positioning System) realizadas con anterioridad a la ocurrencia de este sismo permitieron establecer el grado de acoplamiento en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamérica. Estimaciones preliminares de deslizamiento en la falla indican que el desplazamiento ocurre principalmente en la zona más profunda de acoplamiento. Estas estimaciones indican que no toda la región acoplada se ha activado en esta ocasión, aun faltando por activarse, además de la parte más superficial del contacto, dos zonas: una al norte y otra hacia el sur de la zona de ruptura actual. Ambas zonas (A: Ilo-Cuya y B: Punta Patache-Tocopilla) poseen longitudes similares por lo tanto se esperaría generasen al menos sismos de aproximadamente el mismo tamaño en el futuro, sin embargo, no se puede descartar otro escenario. La productividad sísmica reciente en el sector A es significativamente menor que en el sector B, además ha habido una migración de sismicidad hacia la zona B, ambas observaciones parecerían indicar que el sector sur tendría mayor posibilidad de activarse con anterioridad.

Marco Sismo-tectónico y Laguna Sísmica previa al Terremoto de 2014

La historia sísmica del norte de Chile y sur de Perú se ha caracterizado por la ocurrencia de grandes terremotos en el pasado, tal como lo muestra la Figura 1. Según Comte y Pardo (1991) y Lomnitz (2010), los terremotos de mayor magnitud que han ocurrido en este segmento se remontan a 1604, 1868 y 1877 (Figuras 2 y 3), siendo este último el mayor que ha acontecido en la zona. Kausel (1986) re-evaluó la magnitud de estos últimos eventos (13 de agosto de 1868 y 9 de mayo de 1877) y estima que ambos alcanzaron tamaños equivalentes a magnitudes del orden de 9 (Fig. 1). La “laguna” o “brecha” sísmica corresponde entonces a la región comprendida entre las zonas de ruptura de los terremotos de 2001 por el norte y 2007 por el sur. El terremoto del 23 de junio del 2001, localizado en el sur de Perú, alcanzó una magnitud de magnitud 8.4, en tanto que el sismo de Tocopilla del 14 de noviembre de 2007 fue bastante menor, alcanzando una magnitud de 7.7; la zona de ruptura del terremoto de Tocopilla se encuentra confinada solamente al sector más profundo de la zona de contacto entre ambas placas, por lo que el segmento del contacto que se localiza bajo el mar, hacia la fosa, seguía, antes del 1 de abril sin activarse sísmicamente, tal como lo muestra la Figura 2.

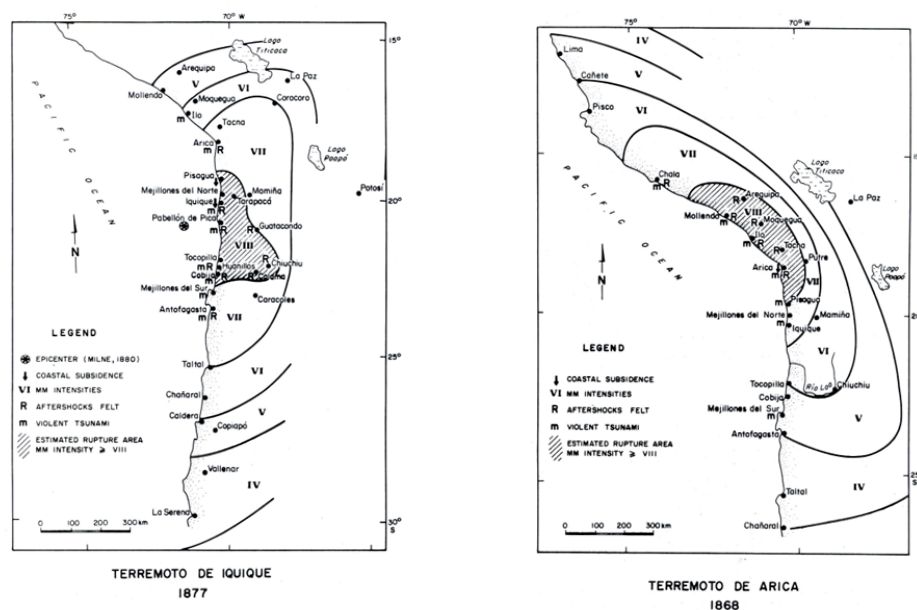


Fig.1. Isositas (curvas de igual intensidad) asociadas a los terremotos de 1868 y de 1877 de acuerdo a Kausel (1986). Las áreas de ruptura de ambos eventos se encuentran, al menos, contenidas en la extensión de la isosista de nivel VIII, por lo que se estima que ambos sismos poseen magnitudes del orden de 9.

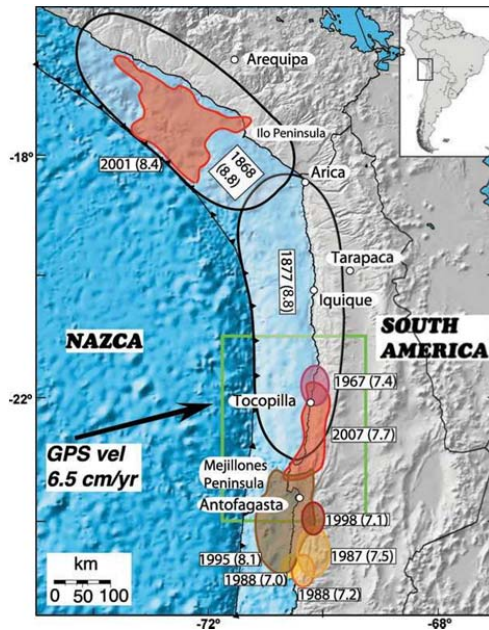


Figura 2. Situación tectónica y localización de las zonas de ruptura de los últimos terremotos significativos en la zona norte de Chile en 1877 y sur de Perú en 1868 (figura de Béjar-Pizarro et al, 2010). En el año 2001 ocurrió un sismo magnitud $M=8.4$ cuya zona de ruptura se extiende solamente hasta la localidad de Ilo, en el sur de Perú. El extremo sur de la zona de silencio sísmico se extiende hasta la zona de ruptura del terremoto de Tocopilla, ocurrido en 2007. La sismicidad que ocurre en el mes de abril se localiza alrededor de los $20^{\circ}S$, frente a las costas de la ciudad de Iquique y la localidad de Pisagua, ubicada unos 70 km al norte.

La Tabla I muestra los sismos en la zona de contacto entre placas que han ocurrido en la zona norte de Chile desde principios del siglo pasado. Sin contar el terremoto de Tocopilla, el de mayor magnitud ocurrió en 1933 en los alrededores de la zona que ahora muestra esta activación sísmica.

Tabla I. Terremotos en la zona de la brecha sísmica desde 1900 (Comte y Pardo, 1991)

| Fecha | Hora | Latitud | Longitud | Prof | |
|------------|-------|---------|----------|-------------|-----|
| 1905 04 26 | 21:43 | 21.0 | 70.0 | Superficial | 7.0 |
| 1906 08 30 | 02:38 | 21.0 | 70.0 | Superficial | 7.2 |
| 1906 12 26 | 06:53 | 18.0 | 71.0 | Superficial | 7.0 |
| 1911 09 15 | 13:10 | 20.0 | 72.0 | Superficial | 7.3 |
| 1928 11 20 | 20:35 | 22.5 | 70.5 | Superficial | 7.1 |
| 1933 02 23 | 09:09 | 20.0 | 71.0 | 40 | 7.6 |
| 1945 04 19 | | 19.5 | 70.0 | Superficial | 7.2 |
| 1947 07 29 | 02:37 | 23.5 | 71.0 | Superficial | 7.0 |
| 1956 01 08 | 20:54 | 19.0 | 70.0 | 11 | 7.1 |
| 1967 12 21 | 02:25 | 21.9 | 70.1 | 20 | 7.3 |
| 1988 04 12 | 23.19 | 17.3 | 72.4 | 5 | 7.0 |

En este siglo además ha ocurrido el terremoto de Tocopilla:

| | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|----|-----|
| 2007 11 14 | 12:40 | 22.25 | 69.89 | 40 | 7.7 |
|------------|-------|-------|-------|----|-----|

La región definida como brecha sísmica se puede subdividir en dos sectores: uno correspondiente a la parte sur de Perú y norte de Chile, que no ha sido activada desde 1868 y el otro a la parte norte de Chile, desde 1877.

Los desplazamientos equivalentes acumulados debido a la convergencia entre la placas de Nazca y Sudamérica alcanzan $(2014-1868=146 \text{ años}) \times 6.5 \text{ cm/año}$ y $(2014-1877=137 \text{ años}) \times 6.5 \text{ cm/año}$, es decir, alrededor de 9.5 y 9 m. Por lo tanto, desde los grandes terremotos ocurridos en los años 1868, en el sur de Perú, y 1877, en el norte de Chile, se han acumulado desplazamientos equivalentes a 9.5 y 9 m, respectivamente.

Suponiendo un posible desplazamiento medio de 10 m en una ruptura de 500 km de longitud por 140 km de ancho (para un módulo de rigidez de 50 GPa) la magnitud del evento alcanzaría alrededor de 9. Esta estimación no considera variaciones en el estado de tensiones con posterioridad al terremoto de 1877 ya que supone la liberación total de tensiones debido a ese evento. Si esto no ha ocurrido, es decir, no ha habido liberación total de tensiones durante este terremoto, entonces la magnitud incluso podría superar el valor de 9.

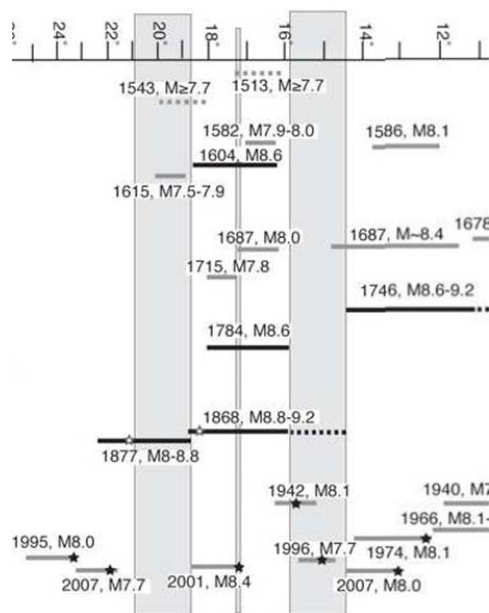


Fig. 3 Historia sísmica del sur de Perú y norte de Chile (Carena, 2011). La frontera en la costa entre ambos países se encuentra alrededor de la latitud 18.35°S . En la región de interés, grandes terremotos han ocurrido en 1604, 1784, 1868, 1877, 2001 (Comte y Pardo, 1991; Lomnitz, 2004). La secuencia de sismos precursoros se ubica en la latitud de 20.2°S . Vargas et al, (2005) incluye un evento en el año 1768.

Vargas (2005), basado en muestras de deslizamientos submarinos, considera que ha existido un sismo de magnitud importante ocurrido en el año 1768.

De manera complementaria, observaciones de deformación de la corteza pueden entregar mayor información para entender de mejor manera cómo y dónde se acumula la deformación y de ese modo determinar la causa que la origina. Observaciones repetitivas de la posición de marcadores ubicados a lo largo de la costa y en el interior permiten establecer la velocidad con la que se deforma la región. El modelo explicativo considera que la placa de Nazca se desplaza bajo la placa Sudamericana a una velocidad del orden de 6.5 cm/año , lo que corresponde a la velocidad de convergencia entre ambas placas. En el contacto entre ambas placas, este desplazamiento no es homogéneo e incluso hay zonas que se encuentran trabadas o bloqueadas. En la Figura 4 se muestra el grado de "bloqueo" o grado de acoplamiento estimado en dos estudios recientes.

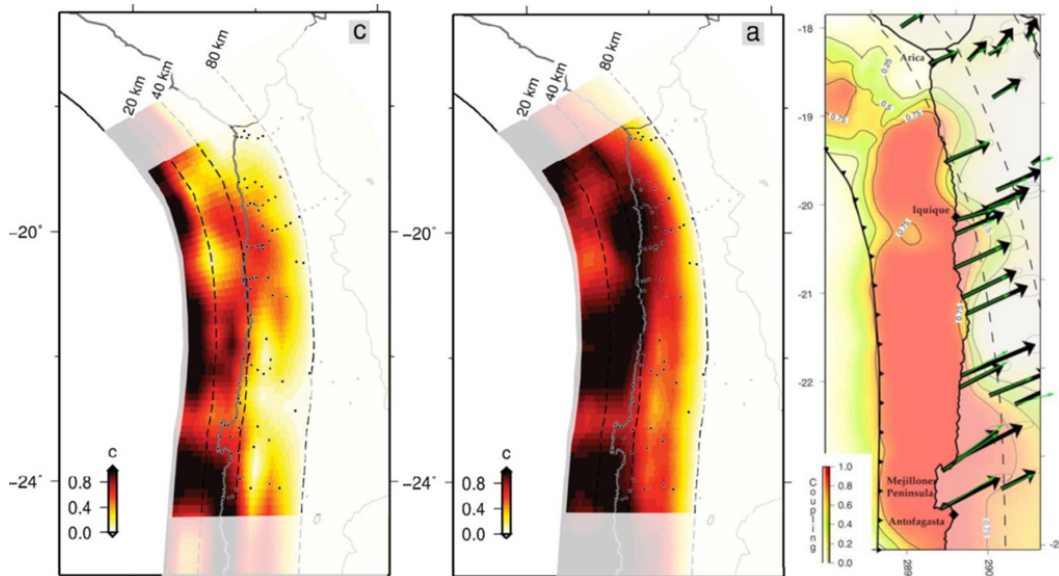


Fig. 4. Interpretación de las zonas que se encuentran totalmente acopladas según Metois et al. (2013), en los dos paneles de la izquierda, y Chlieh et al. (2011), en el panel de la derecha, a partir de la deformación observada en instrumentos GPS ubicados en la costa y el interior de Chile. Mientras más oscura la zona, mayor es el grado de acoplamiento. Aunque el modelo presentado en la figura de la izquierda permite un mejor ajuste de las observaciones, ya que posee un mayor número de parámetros a invertir, las soluciones son consistentes y muestran prácticamente las mismas zonas donde existe un mayor acoplamiento entre placas. El modelo de Chlieh et al. (2011) presenta un mayor grado homogéneo de acoplamiento en la región, especialmente en el sector meridional de la región.

De acuerdo a la Figura 4, la suposición de un desplazamiento medio del orden de 10 m en todo el plano de contacto parece ser exagerado; según el grado de acoplamiento mostrado en esta figura, solamente se pueden suponer 10 m en una región de la zona de contacto y no en todo el entorno, de modo que la estimación de la magnitud es por exceso. Si bien los modelos muestran en general un fuerte grado de acoplamiento en la zona de la brecha sísmica, estos difieren en el nivel de detalle debido a que utilizan diferentes observaciones y metodologías de inferencia. Metois et al. (2013) utiliza observaciones más recientes con una mayor densidad espacial y temporal. De acuerdo al modelo de acoplamiento de Metois et al (2013), al norte de la Península de Mejillones, habría dos segmentos acoplados en su grado máximo en la parte más superficial del contacto, uno hacia el norte de los 20°S y el otro centrado en los 22°S (frente a las costas de Tocopilla), que posee una extensión en profundidad.

Béjar-Pizarro et al. (2013), basados en la deformación obtenida por repetición de observaciones GPS e InSAR (Inteferometric Synthetic Aperture Radar), y utilizando un modelo de deformación elástica, habían adelantado que se podría producir desplazamientos suficientes para generar un evento de magnitud del orden de 8.6.

Sismicidad Observada

El sismo principal de la secuencia ($M_w=8.2$) ocurre el día 1 de abril de 2014 a las 20:46:45 hora local con epicentro en 19.572°S y 70.908°W y profundidad de 38.9 km. Onemi reporta intensidades máximas de VIII en las localidades de Arica, Codpa y Cuya. En Iquique, Alto Hospicio la intensidad reportada alcanza a VII.

A partir del proceso automático preliminar, la magnitud se estimó en $M_w=7.8$, y las coordenadas iniciales del epicentro difieren en alrededor de 20 km con respecto al reporte final.

Tabla II. Evolución de la información entregada por el CSN

| | 1 ^{er} reporte | 2 ^{do} reporte | 3 ^{er} reporte | Reporte Final |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| Emisión reporte en minutos luego de origen sismo | 6.90 | 19.92 | 52.98 | 133.7 |
| Hora local | 20:46:47 | 20:46:45 | 20:46:45 | 20:46:45 |
| Hora UTC | 23:46:47 | 23:46:45 | 23:46:45 | 23:46:45 |
| Latitud S | 19.750 | 19.560 | -19.572 | 19.572 |
| Longitud W | 70.860 | 70.917 | -70.908 | 70.908 |
| Profundidad (km) | 44.0 | 46.4 | -38.9 | 38.9 |
| Magnitud (M_w) | 7.8 | 7.9 | 8.3 | 8.2 |
| Ref. Geográfica | 85 km al SO Cuya | 89 km SO de Cuya | 89 km al SO Cuya | 89 km al SO de Cuya |

La Tabla III contiene la estimación del tamaño, geometría de falla y profundidad de las diferentes soluciones entregadas por agencias internacionales.

Tabla III

| Tipo | Momento ($\times 10^{21}$ Nm) | Magnitud | Plano de falla | Profundidad (km) | Autor |
|------|--------------------------------|----------|----------------------------------|------------------|--------|
| Mww | 2.35 | 8.2 | $358^\circ, 12^\circ, 107^\circ$ | 25.5 | USGS |
| Mwc | | 8.1 | $340^\circ, 14^\circ, 74^\circ$ | 33.0 | |
| Mwc | 1.69 | 8.1 | $357^\circ, 18^\circ, 109^\circ$ | 21.9 | GCMT |
| Mw | 1.6 | 8.1 | $346^\circ, 13^\circ, 84^\circ$ | 34 | GEOFON |

Los acelerogramas registrados en las estaciones cercanas se encuentran disponibles, bajo Informes, en la página web del Centro Sismológico Nacional, www.sismologia.cl. Un resumen de las aceleraciones máximas registradas se encuentra en el Anexo I preparado por el Dr. Felipe Leyton.

Sismicidad precursora

Dos semanas antes de la ocurrencia del sismo principal el 16 de marzo a las 18:16:29:0 (hora local), se origina un sismo de magnitud estimada en $M_w=6.7$ (a partir del método fase-W) en las coordenadas geográficas 19.965°S y 70.814°W a unos 20 km de profundidad. La Oficina Nacional de Emergencia reportó intensidades VI en Arica, Alto Hospicio e Iquique. El GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) reporta un momento sísmico de 1.4×10^{19} Nm y la geometría de la falla queda representada por los planos orientados 294°E con un ángulo de

inclinación de 25° y un ángulo de deslizamiento de 87° (los valores correspondientes al plano conjugado son 117° , 66° y 91°). De acuerdo a esta representación, el sismo ocurre en la zona de contacto entre la Placa de Nazca y Placa Sudamericana, lugar donde se originan los terremotos de gran extensión que han afectado al país.

Estos sismos son el resultado de pequeños desplazamientos, del orden de unas pocas decenas de cm, en la zona de contacto de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. La magnitud del evento precursor más grande de la secuencia de sismos registrada es M_{ww} 6.7, lo que puede ser asociado a una falla equivalente de unos 40 km de longitud por unos 15 km ancho con un desplazamiento menor que 1m; a modo de comparación, cabe recordar que sismos cuyas magnitudes bordean 8 pueden alcanzar desplazamientos en la falla del orden de varios metros. Como referencia, para el sismo $M=8.8$ de 2010 en la zona central de Chile y para el megaterremoto de 1960 en la zona sur, los desplazamientos máximos estimados son del orden de 20 m y 40 m respectivamente.

Estaciones sismológicas instaladas a partir de 2008, como parte de un acuerdo con GeoForschungsZentrum Potsdam, el Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) e instituciones nacionales, entregan información confiable para efectuar estimaciones de los parámetros sísmicos de los eventos que ocurren en esa zona. La Figura 5 muestra la actividad sísmica ocurrida a partir del año 2008 hasta marzo de 2014. Los círculos de color rojo muestran aquellos sismos que ocurren en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamérica, en tanto que los círculos de color azul representan sismos en el interior de la placa que subducta (Nazca).

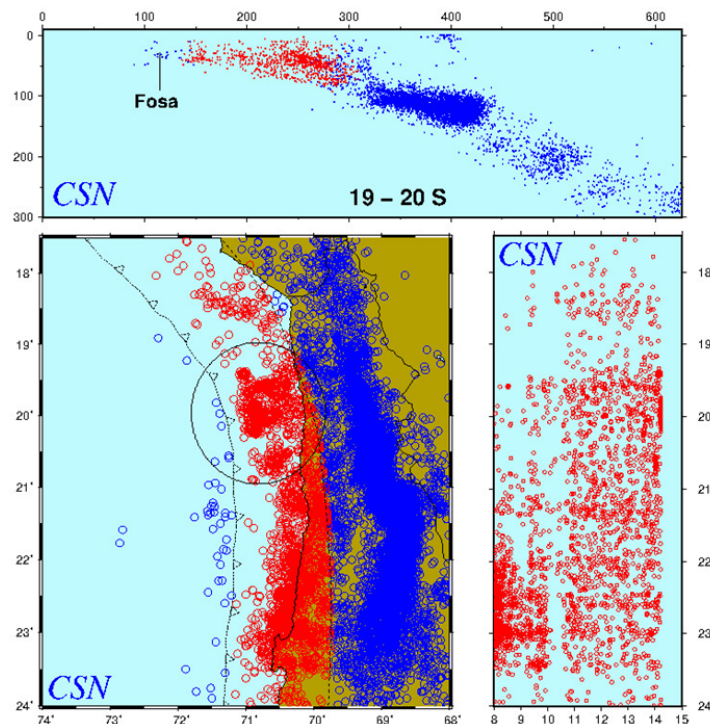


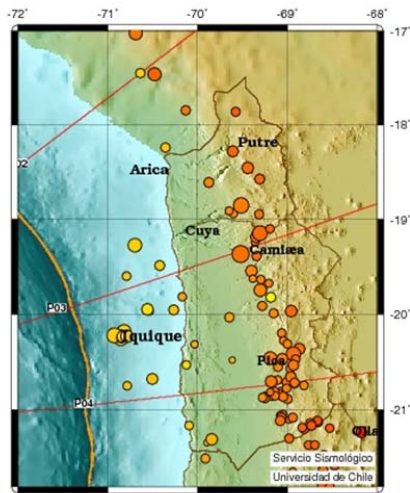
Fig. 5. Sismicidad registrada en la región de la laguna sísmica durante 2008-2014. La vista en planta (abajo, izquierda) muestra la sismicidad que se principalmente encuentra asociada a la zona de contacto entre placas (interplaca, circunferencias de color rojo) y aquella que ocurre al interior de las placas de Nazca y Sudamérica (intraplaca, circunferencias de color azul). El panel inferior derecho muestra la actividad sísmica en función del tiempo (años) desde la instalación de la red de vigilancia sísmica en el norte por GFZ e IPGP hasta marzo de 2014. El panel superior muestra un perfil de la actividad sísmica en función de la profundidad.

La sismicidad en la zona de contacto (circunferencias de color rojo) revela que esta actividad sísmica no es homogénea en el sector de la brecha o laguna sísmica. Se puede apreciar una alta concentración de réplicas del terremoto de Tocopilla de 2007. Hacia el norte de los 17.5°S , es decir fuera de los límites de la figura, existe una menor capacidad de detección de sismicidad dada la ausencia de información desde el sur de Perú. Sin embargo, en el resto de la región la red posee la misma capacidad de detección de modo que la significativa menor sismicidad que se observa hacia el norte de los 19.3°S es real y no corresponde a un artefacto creado por una distribución no-homogénea de estaciones sismológicas. Este cambio de nivel de sismicidad probablemente represente condiciones tectónicas diferentes al norte y al sur de esta latitud.

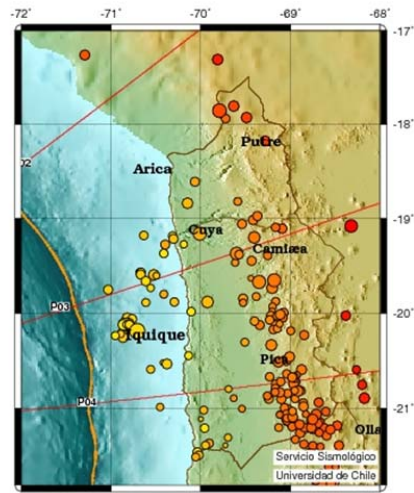
La zona que se activó en la secuencia de abril de 2014 se extiende desde aproximadamente los 19.3°S hasta los 20.8°S , es decir, abarca las dos concentraciones de sismicidad y coincide la concentración más extensa con la zona de ruptura del terremoto $M_w=8.2$ y la menor con la réplica principal, de magnitud $M_w=7.6$.

Uno de los aspectos interesantes que se observa en la Fig. 5, es la sismicidad que se ubica al oeste de la fosa ("outer-rise"); el número de sismos ubicados más allá de la fosa es mayor entre los 20.5°S y los 22.5°S , una tarea a futuro es determinar de manera precisa la geometría de la falla. Para ello es fundamental contar con sistemas de observación submarinos (OBS, Ocean bottom seismometers).

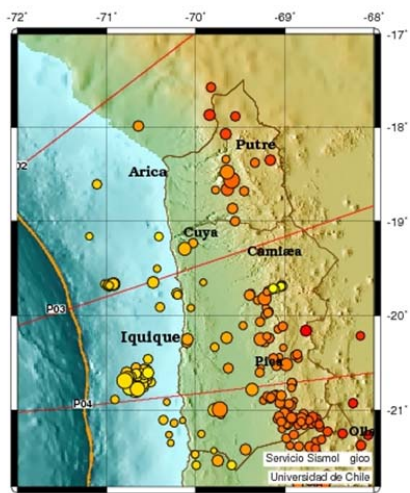
La Figura 6 muestra la actividad sísmica ocurrida en los meses de julio y agosto de 2013 así como enero y marzo de 2014. Se puede apreciar una concentración de actividad frente a las costas de Iquique en los meses de julio y agosto de 2013. Esta actividad migra hacia el sur durante el mes de enero de 2014 y se concentra luego al norte en marzo, que corresponde a la actividad inmediatamente precursora.



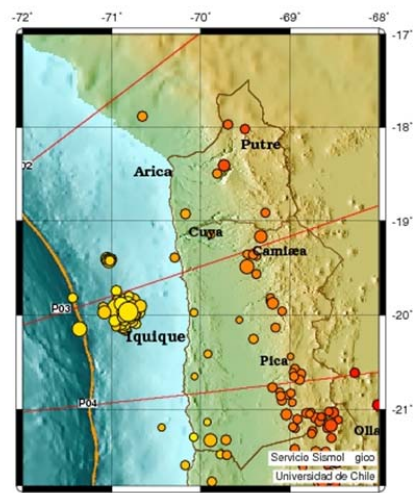
Julio 2013



Agosto 2013



Enero 2014



Marzo 2014

Fig. 6. Los círculos de color amarillo representan la sismicidad superficial asociada a las diferentes etapas en el proceso de liberación de energía sísmica en la región durante los períodos de julio, agosto de 2013 y enero de 2014. El último panel muestra la sismicidad durante el mes de marzo de 2014. Los círculos de color naranja representan la sismicidad en profundidades entre 80 y 120 km bajo la Cordillera de Los Andes. Esta sismicidad refleja el estado de tensiones al interior de la placa que subducta (Nazca) y sugiere que el contacto inter-placa se encuentra acoplado.

La Figura 7 muestra la evolución de la sismicidad entre el 16 de marzo y el 15 de abril. Las estrellas de color amarillo muestran la ubicación del precursor principal (M=6.7), sismo principal (M=8.2) y réplica principal (M=7.6). Los círculos de color amarillo muestran los sismos con magnitud superior a 6 en esta secuencia.

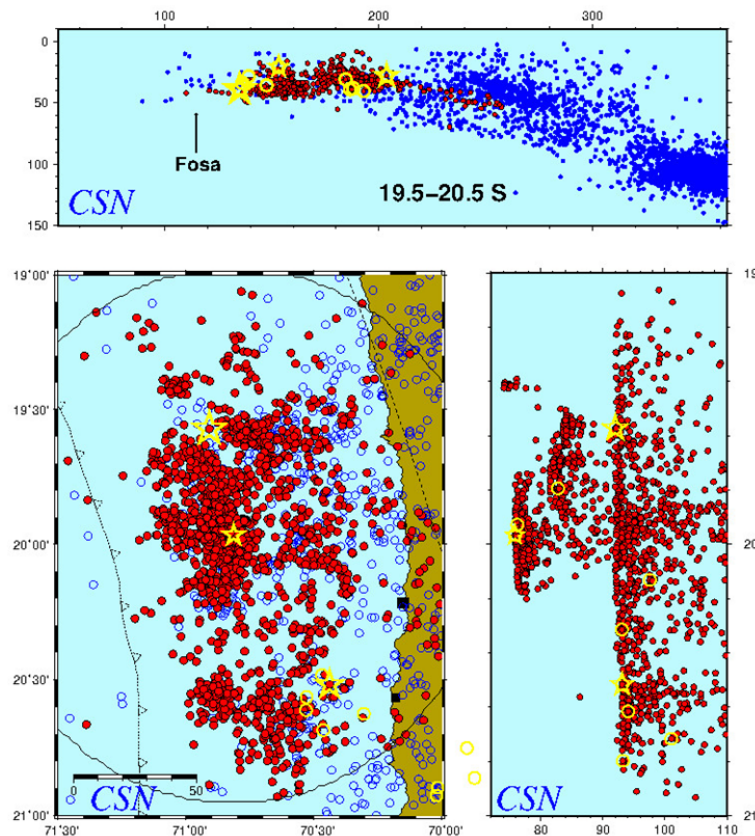


Fig. 7 Sismicidad asociada a la secuencia sísmica de marzo-abril de 2014. a) Panel izquierdo inferior: Los círculos de color rojo muestran epicentros de sismos ubicados en la zona de contacto entre las placas de Nazca y Sudamérica. Las estrellas de color amarillo muestran el sismo principal, su precursor y la réplica principal. Los círculos de color amarillo representan los sismos con magnitud superior a 6. b) En el panel derecho inferior, se muestra la sismicidad latitudinal en función del tiempo.

Uno de los aspectos destacables de la sismicidad mostrada en la Figura 7 es su evolución. La secuencia precursora, del sismo M=6.7 ocurre aproximadamente a los 19.96°S y la extensión latitudinal de las réplicas de este precursor alcanza unos 44 km. De acuerdo a estimaciones de las longitudes de ruptura (Ward, 2010) un sismo de magnitud 6.7 debiese alcanzar una longitud de ruptura de unos 35 km con un desplazamiento medio de 70 cm. En cambio, para un sismo de magnitud 8.2 estos valores alcanzarían unos 200 km y 2 m, en tanto que para la réplica principal serían del orden de 100 km y 1 m respectivamente. Obviamente son valores promedio en la falla y no consideran variaciones de desplazamiento.

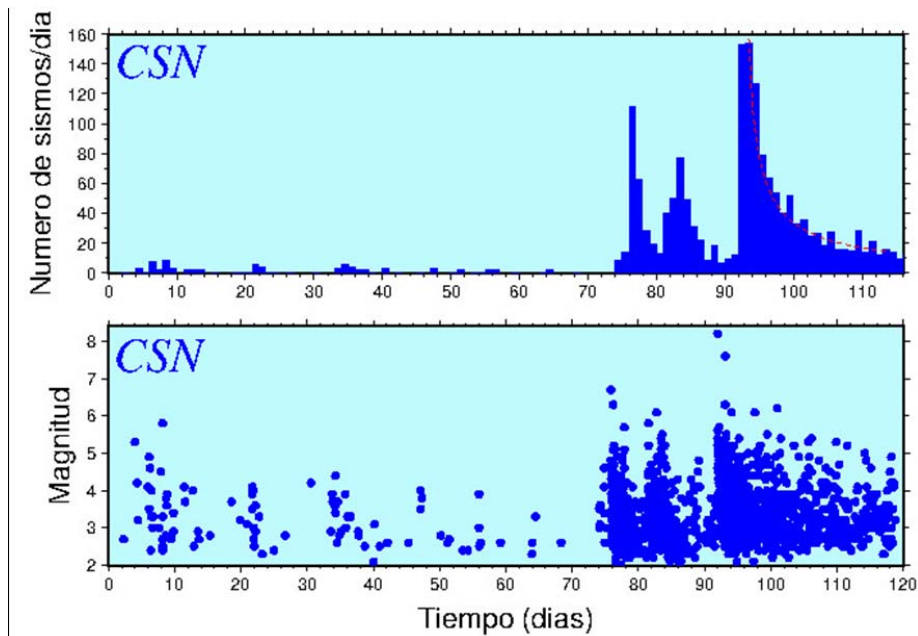


Fig 8. Distribución de las magnitudes y número de sismos por día a partir del 1 de enero en función del tiempo. El día 100 del año 2014 corresponde al 11 de abril. Valores superiores a 150 sismos por día se registraron el 17 de marzo y el 2 y 3 de abril. Hasta el día 106, es decir el 16 de abril, se registraron y localizaron más de 900 réplicas. Como se puede apreciar en el panel inferior, el umbral de localización alcanza a sismos de magnitud un poco superior a 2.

La Figura 8 indica que ha habido concentración de sismicidad en la región en los meses de enero y febrero de 2014. La sismicidad aumenta significativamente el día 76, correspondiente al 16 de marzo, que corresponde a las réplicas del precursor principal de magnitud $M=6.7$. La secuencia que ocurre con posterioridad al día 92 (1 de abril, fecha del sismo $M=8.2$) posee las características esperadas para una secuencia de réplicas, principalmente dadas por la ley modificada de Omori que relaciona el número de eventos con en función del tiempo: $N(t) = k(t+c)^{-p}$ (ver discusión en Utsu et al, 1991). Al considerar la secuencia de réplicas del sismo mayor, del 1 de abril, el valor de p es 0.98 y se estima que habrá incluso un sismo diario luego de haber transcurrido un año.

Lo que sucede entre ambas secuencias probablemente se podría interpretar como la actividad sísmica asociada a dos sismos de magnitud del orden de 6, sin embargo posee un comportamiento diferente cuando se observa la distribución del número de eventos por hora, la que se muestra en la Fig. 9.

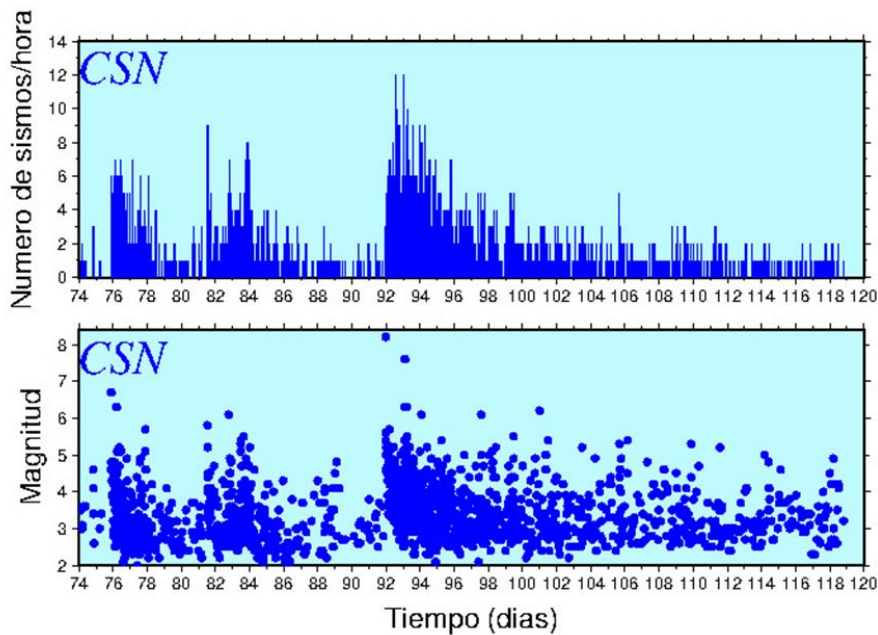


Fig. 9. Distribución del número de sismos por hora y su magnitud en función del tiempo a partir del día 14 de marzo de 2014, dos días antes que ocurriese el principal sismo precursor ($M=6.7$) de la secuencia. El gráfico se extiende hasta el día 110, que corresponde al 20 de abril.

Al examinar la distribución del número de eventos por hora conjuntamente con la distribución temporal de sus magnitudes, tal como se muestra en la Fig. 9, se observa que, de las tres secuencias, la primera y la tercera se encuentran asociadas a sismos de magnitud importante. La segunda, en cambio, es una secuencia que tiene su máximo varias horas después de ocurrido el sismo máximo relativo con el consecuente decaimiento del número de sismos de manera diferente de las otras dos, evidenciando un comportamiento distinto a lo que muestran tanto la secuencia precursora como la del sismo principal.

Esfuerzos en la región

La orientación de los esfuerzos en la región se puede determinar a partir de la geometría de las fallas que se activan. La Figura 10 muestra la actividad sísmica de mayor magnitud ($M > 5.5$) ocurrida en la región de la "laguna sísmica" desde 1976, año en que comienza el Global Moment Tensor Project (Ekström et al., 2012). Los mecanismos de foco de los sismos ubicados en la zona de acoplamiento (entre la fosa y la línea segmentada que representa una profundidad de 50 km, son consistentes con compresión a lo largo de la convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. Los mecanismos de foco de aquellos sismos ubicados al interior de la placa subductante son consistentes con extensión a lo largo de la subducción. Las esferas focales de color rojo corresponden a los sismos de mayor magnitud registrados en la región y los de color amarillo representan la actividad precursora, sismo principal y réplicas del terremoto del 1 de abril de 2014.

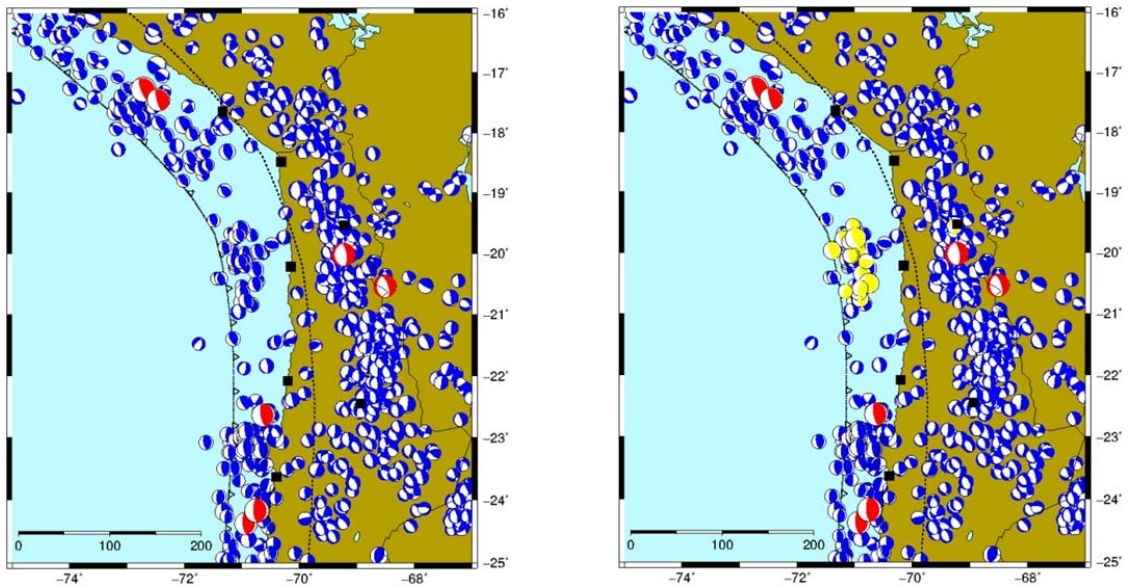


Fig. 10. Geometría de las fallas asociadas a los sismos ocurridos en el norte de Chile y sur de Perú desde 1976 hasta el 16 de marzo (panel izquierdo) y hasta el 14 de abril (panel derecho) de 2014 según el Global Centroid Moment Tensor Project (GCMT, <http://www.globalcmt.org>, Ekström et al., 2012). Las esferas de color rojo corresponden a la actividad de mayor magnitud en tanto que las de color amarillo reflejan la actividad desde el 16 de marzo hasta el 14 de abril.

Es interesante destacar que la actividad sísmica de mayor magnitud asociada a la secuencia tanto precursora como de réplicas del sismo del 1 de abril ocurre en una zona que se había estado activando con anterioridad, tal como se había evidenciado a través de la sismicidad precursora de menor magnitud.

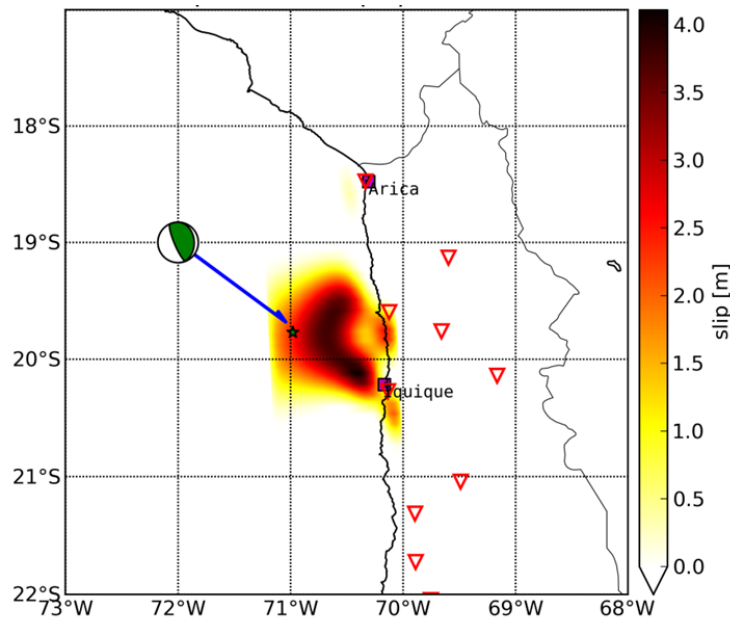


Fig. 11. Solución preliminar de desplazamiento en la falla a lo largo de la zona de contacto entre las placas de Nazca y Sudamérica de acuerdo a C. Peña y K. Bataille (U. de Concepción, comunicación personal). La solución corresponde a la solución de longitud mínima y de mayor suavidad. Los datos corresponden a los movimientos observados mediante GPS (Global Positioning System,) en las estaciones del International Plate Boundary Observatory Chile (IPOC), ya descritas con anterioridad, con procesamiento en tiempo real realizado por el Dipl.-Ing. Mitja Bartsch (GeoForschungsZentrum Potsdam, GFZ, Alemania). El epicentro es el determinado por el CSN y la geometría de la falla o mecanismo focal corresponde a los resultados del Global Centroid Moment Tensor Project.

Tal como se puede apreciar en la Figura 7, la mayor parte de las réplicas se encuentra ubicada entre los $19^{\circ} 30' S$ y $20^{\circ} 12' S$, y $70^{\circ} 18' W$ y $71^{\circ} W$ lo que corresponde a la zona de mayor desplazamiento en la falla, según se muestra en la Fig. 11. Los máximos de desplazamiento alcanzan a valores del orden de 4 m, pudiendo incluso ser mayores en forma puntual, ya que esta solución presenta aquella de menor longitud en la inversión que a su vez se encuentra suavizada. El plano en el que ocurre la dislocación que correspondería -según el Global Centroid Moment Tensor Project (Ekström et al., 2012)- a la falla activada, tendría un rumbo de $3^{\circ} W$, una inclinación de 19° y un ángulo de deslizamiento de 109° . La duración de la función de tiempo en la fuente es del orden de 54 s. Nótese que existe un sector hacia la fosa en el que no ha habido mayor desplazamiento. El momento total alcanza un valor de 2.12×10^{21} Nm, lo que corresponde a una magnitud $M=8.15$.

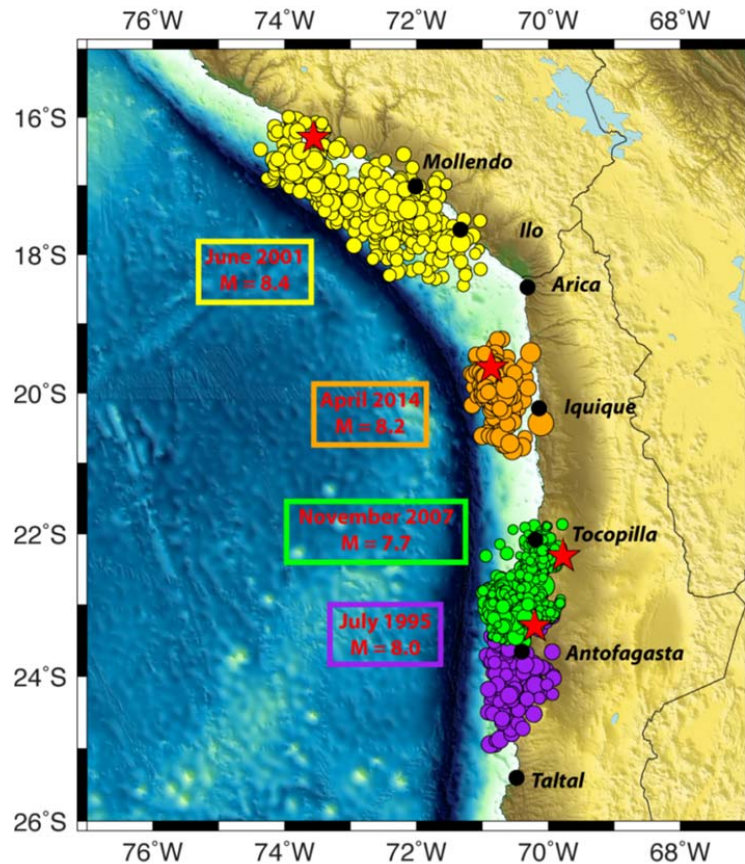


Fig. 12. Sismicidad de un mes de duración (a lo máximo) asociada a cada terremoto ocurrido –de norte a sur- en junio de 2001 ($M=8.4$), abril de 2014 ($M=8.2$), noviembre de 2007 ($M=7.7$) y julio de 1995 ($M=8.0$), que han sido los terremotos más importantes ocurridos en la región recientemente. Figura proporcionada por la Dra. Susan Beck y Jonathan Delph, de la Universidad de Arizona.

Al considerar las réplicas -acontecidas durante un mes de duración- de los sismos más importantes ocurridos en la zona sur de Perú y norte de Chile, se puede estimar la zona de ruptura de cada uno de ellos (Fig. 12). El mayor sismo no considerado desde 1868 ó 1877 (ver Fig. 1) corresponde al sismo $M=7.6$ ocurrió en 1933 (ver Tabla I) cuyo epicentro habría coincidido con el epicentro del sismo precursor de la secuencia actual. De acuerdo a esta figura, habría dos sectores donde no han ocurrido sismos mayores o desplazamientos significativos de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana en las últimas décadas: Zona A) desde Cuya hasta Ilo (zona frente a la ciudad de Arica), que corresponde a la zona localizada entre las rupturas de 2001 y 2014, y Zona B) desde Punta Patache (un poco al sur de la ciudad de Iquique) hasta Tocopilla, que corresponde a la zona localizada entre las rupturas de 2007 y 2014. También se podría incluir en las regiones con poco o nulo desplazamiento entre ambas placas a aquellas zonas ubicadas a lo largo del plano de subducción en la parte superior de las zonas de ruptura de los terremotos de 2007 y el actual, de 2014 (zona C).

Dada la continua carga producida por la convergencia entre placas del orden de 6.5 cm/año, uno de los escenarios futuros más probables es que se activen con rupturas sísmicas las regiones identificadas como zonas A, B, y posiblemente C. Las zonas A y B poseen una longitud casi equivalente a la región activada en 2014, de modo que si se activasen cada una por separado, las magnitudes máximas serían del mismo orden que aquella mostrada por el evento de 2014, es decir, alrededor de 8.2. Si se activasen las dos, o incluso las tres (incluyendo al sector C), la magnitud del evento sería mayor.

Discusión

La zona del norte de Chile y sur de Perú, ubicada entre la localidad de Ilo por el norte hasta Tocopilla (o Península de Mejillones) por el sur, se encontraba en lo que se denomina una "laguna sísmica" ya que no habían ocurrido sismos de magnitud significativa desde 1868 y 1877, los últimos eventos ocurridos en esta región con magnitud superior a 8½. Al examinar los modelos de acoplamiento entre las placas de Nazca y Sudamérica se puede inferir que en el transcurso de estos 137 años se habrían acumulado en la interface desplazamientos equivalentes a valores del orden de 10 m. Estas cifras son solamente una estimación con bastante incerteza ya que no se conoce el estado de tensiones en la falla inmediatamente después del evento de 1877.

Al ocurrir el sismo de abril de 2014, la zona de la "laguna sísmica" se subdivide en tres sectores de aproximadamente igual tamaño. El sector que se activa, desde aproximadamente Pisagua hasta Punta Patache, de unos 150 km de extensión, presenta posiblemente un desplazamiento máximo de unos 5-6 m, principalmente ubicados en la parte más profunda de la zona de contacto entre placas. La magnitud del sismo, de acuerdo a estimaciones preliminares geodésicas, alcanza a 8.15. Los segmentos localizados hacia el norte (Ilo-Pisagua) y hacia el sur (Punta Patache-Tocopilla) del segmento que se ha activado en abril último, y que no han sufrido desplazamientos recientes, han quedado adicionalmente cargados y es esperable que se activen en el futuro sin poder precisar fecha. Sin embargo, el escenario más probable -dadas las extensiones de las regiones que no se han activado recientemente- las magnitudes esperables serían del orden de 8.1 – 8.2 en cada segmento. No se puede descartar que ambas zonas se activen simultáneamente produciendo un sismo mayor, puesto que también existe.

Es necesario enfatizar una vez más que Chile es un país sísmico y prácticamente cualquier lugar de su territorio puede verse afectado por un sismo significativo. Es por lo tanto nuestro deber como habitantes de este país estar preparados permanentemente para enfrentar las posibles consecuencias que estos eventos puedan producir.

Sergio Barrientos
25 abril 2014

Referencias

Béjar-Pizarro, M. et al. (2010) et al., Asperities and barriers on the seismogenic zone in North Chile: State-of-the-art after the 2007Mw 7.7 Tocopilla earthquake inferred by GPS and InSAR data. *Geophys. Jour. Int.*,doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04748.x

Béjar-Pizarro, M. et al. (2013), Andean structural control on interseismic coupling in the NorthChile subduction zone, *NatureGeosc.* 6, 462-46.

Carena, S. (2011),Subducting-plate Topography and Nucleation of Great and Giant Earthquakes along the South American Trench,*Seism.Res. Lett.*, September/October, v. 82.

Chlieh, M., et al. (2011), Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone, *J. Geophys. Res.*,116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166.

Comte, D. y M. Pardo (1991), Reappraisal of Great Historical Earthquakes in the Northern Chile and Southern Peru Seismic Gaps, *Natural Hazards* 4: 23-44, 1991.

Giovanni, M.K., Beck, S.L. & Wagner, L (2002), The June 23, 2001 Peru earthquake and the southern Peru subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 14–1, doi:10.1029/2002GL015774.

Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski (2012), The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 200-201, 1-9, 2012. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002

Kagan, Y. y D. Jackson, (1991), Seismic Gap Hypothesis' Ten Years After. *J. Geophys. Res.*, V. 96, pp. 21,419-21,431, Dec.

Kausel E. (1986) “Los terremotos de Agosto de 1868 y Mayo de 1877 que afectaron el sur del Perú y norte de Chile”. *Bol. Acad. Chil. Cienc.*, 3, 8-12.

Lomnitz, C. (2004), Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. *Seism. Res. Lett.* May/June V75, N3.

McCann, R.S., S.P. Nishenko, L.R. Sykes and J. Krause, (1979). Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries, *PAGEOPH*, 117, pp. 1,082- 1,147.

Metois, M. et al. (2013) Revisiting the North Chile seismic gap segmentation usingGPS-derived interseismic coupling, *Geophys. Jour. Int.*,doi: 10.1093/gji/ggt183.

Utsu, T., Ogata, Y. y. Matsu'ura, R. S (1995). The Centenary of the Omori Formula for a Decay Law of Aftershock Activity, *J. Phys. Earth*, 43, 1-33.

Vargas, G. et al. (2005). Paleoseismic inferences from a high-resolution marine sedimentary record in northern Chile (23°S), *Tectonophysics* 399, 381 – 398.

Anexo I

Aceleraciones máximas registradas en estaciones de IPOC y CSN.

Ver reporte preparado por el Dr. Felipe Leyton bajo Informes en www.sismologia.cl

| Estación | Coordenadas | | PGA (% g) | | |
|----------|-------------|----------|-----------|-------|----------|
| | Latitud | Longitud | Norte | Este | Vertical |
| TA01 | -20.5657 | -70.1807 | 19.41 | 17.24 | 7.46 |
| PSGCX | -19.5972 | -70.1230 | 20.21 | 17.96 | 14.18 |
| PB16 | -18.3351 | -69.5077 | 3.62 | 3.00 | 2.46 |
| PB15 | -23.2083 | -69.4709 | 5.37 | 5.01 | 2.51 |
| PB12 | -18.6141 | -70.3281 | 9.87 | 10.8 | 6.91 |
| PB11 | -19.7610 | -69.6558 | 73.45 | 49.4 | 48.29 |
| PB10 | -23.5134 | -70.5541 | 0.36 | 0.36 | 0.26 |
| PB09 | -21.7964 | -69.2419 | 6.83 | 8 | 4.59 |
| PB08 | -20.1411 | -69.1534 | 9.52 | 8.3 | 5.92 |
| PB07 | -21.7267 | -69.8862 | 3.97 | 6.31 | 4.2 |
| PB06 | -22.7058 | 69.5719 | 1.95 | 1.75 | 1.3 |
| PB05 | -22.8528 | -70.2024 | 1.24 | 1.23 | 1.04 |
| PB04 | -22.3337 | -70.1492 | 3.59 | 2.97 | 2.41 |
| PB03 | -22.0485 | -69.7531 | 2.94 | 3.68 | 3.29 |
| PB02 | -21.3197 | -69.8960 | 8.69 | 16.66 | 11.13 |
| PB01 | -21.0432 | -69.4874 | 10.48 | 10.58 | 7.1 |
| MNMCX | -19.1311 | -69.5955 | 49.92 | 31.31 | 25.65 |
| GO01 | -19.6686 | -69.1942 | 35.77 | 23.94 | 16.26 |