

## PELIGROSIDAD SÍSMICA ASOCIADA A EVENTOS NEOTECTÓNICOS

Carlos Costa<sup>1</sup>, Patricia Alvarado<sup>2</sup>, Carlos Navarro<sup>3</sup> y Mario Araujo<sup>3</sup>

1. Universidad Nacional de San Luis 2. CONICET–Universidad Nacional de San Juan  
3. Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) San Juan

### RESUMEN

La historia sísmica de la provincia del Neuquén solo registra sismos de moderada a baja magnitud localizados dentro de su territorio. No obstante, fallas con actividad neotectónica e importantes fenómenos de inestabilidad de laderas han sido documentados en la región andina, los cuales estarían vinculados con eventos sísmicos de mayor tamaño que aquellos medidos instrumentalmente para esta región. Esto sugiere que la evaluación del peligro sísmico no debe ser subestimada dentro del territorio provincial.

**Palabras clave:** Peligro sísmico, neotectónica, sismicidad, Neuquén

### ABSTRACT

*Seismic risks in association with neotectonic activity.*—The seismic history of the Neuquén province only exhibits records of low to moderate magnitude local earthquakes. However, neotectonic activity in faults and the occurrence of slope failure processes at the Andean region may have been presumably triggered by significant seismic events of larger sizes than those instrumentally recorded for the same region. This framework suggests that the evaluation of the seismic hazard should not be underestimated in the Neuquén territory.

**Key words:** Seismic hazard, neotectonics, seismicity, Neuquén

### INTRODUCCIÓN

Para estimar la exposición de una región a la amenaza sísmica, es necesario considerar como aspectos principales: 1) La distribución espacio-temporal y características de la sismicidad histórica e instrumental; 2) La presencia de fuentes sismogénicas potenciales vinculadas a estructuras con actividad neotectónica y 3) La susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos inducidos por el sacudimiento del terreno (*ground-shaking*) durante un evento sísmico.

El territorio de la provincia del Neuquén no está comprendido dentro de la región más crítica del país respecto a la ocurrencia y probabilidad de repetición de sismos históricos destructivos. No obstante, la existencia de estructuras activas durante el Cuaternario (< 1.8 Ma) ha sido documentada en el sector andino y periandino (Folguera *et al.*, 2004; 2006; 2008; Rojas Vera *et al.*, 2010). También se han descrito en esa región importantes fenómenos de inestabilidad de laderas, vinculados a terremotos prehistóricos (González Díaz 1988; Escosteguy *et al.* 1999; González Díaz *et al.* 2000; 2001; 2006; González Díaz & Folguera 2005; Hermanns *et al.* 2003; 2005; Costa & González Díaz 2007, entre otros).

La presente contribución pretende realizar una semblanza del conocimiento actual de los aspectos enunciados más arriba.

#### Contexto sismotectónico

El incremento del ángulo de subducción de la placa de Nazca durante los últimos 5 Ma ha determinado la migración de la actividad tectónica más reciente hacia el retroarco, dentro de la vertiente oriental andina. Los fenó-

menos neotectónicos contraccionales son más notorios entre los 36° y 38° S y han sido particularmente activos durante los últimos 1.7 Ma (Folguera *et al.* 2004; Folguera & Ramos 2009). Este rasgo diferencia a los Andes de Neuquén de otros sectores del frente orogénico andino, donde la deformación más reciente aparece en el sector pedemontano. Cabe destacar que el frente orogénico actual tampoco muestra en la actualidad una sismicidad somera prominente para una corteza de unos 40 km de espesor (Gilbert *et al.* 2006). El presente contexto sismotectónico, así como los reportes de sismicidad histórica (INPRES 2010), indican que la información relevante para la caracterización de la amenaza sísmica está concentrada en el sector montañoso andino en los primeros 20 km de profundidad.

#### Sismicidad histórica e instrumental

En el segmento latitudinal correspondiente al territorio neuquino se reconoce una distribución bimodal de la sismicidad, distinguiéndose entre aquellos eventos de subducción profunda de la zona de Wadati-Benioff (125-150 kms) y la sismicidad concentrada dentro de la placa Sudamericana (Fig. 1). El primer tipo de eventos corresponde a la actividad intraplaca de la placa subducida y se debe principalmente a los esfuerzos de *slab-pull* en su descenso hacia las zonas más profundas del manto. Esta sismicidad ha generado intensidades moderadas a bajas (< IV IMM-Intensidad de Mercalli Modificada) dentro del territorio provincial (INPRES 2010).

La distribución de la sismicidad de retroarco en la placa Sudamericana muestra variaciones latitudinales significativas, distinguiéndose una mayor concentración de episodios sísmicos desde los 33° S hasta los 38° S y al

oeste de los 70° O, agrupados en el cinturón montañoso andino (Barrientos & Acevedo 1992; Barrientos *et al.* 2004; Barrientos 2007; INPRES 2010). Las fuentes sísmicas determinadas con fases sísmicas son mayoritariamente transcurrentes probablemente con componente dextral, a lo largo de estructuras de rumbo norte-sur en la Cordillera Principal con alto ángulo de buzamiento (Barrientos *et al.* 2004; Charrier *et al.* 2004; Comte *et al.* 2008).

No existen antecedentes de rupturas sísmicas históricas en territorio neuquino vinculadas a eventos sísmicos corticales. Las crisis sísmicas más importantes registradas en tiempos históricos corresponden a eventos significativos ( $M > 8$ ) con epicentros localizados en la zona de subducción somera, como los terremotos ocurridos en los

años 1835, 1960 y el reciente evento de 2010, entre otros. Los mismos causaron importantes daños y destrucción en Chile, pero afectaron en forma mucho más atenuada a este sector en Argentina. Las observaciones de GPS relacionadas con la ocurrencia del terremoto Mw 8.8 del 27/04/2010, han confirmado que los efectos de los desplazamientos repentinos en la zona de ruptura del terremoto alcanzan en el territorio de la provincia del Neuquén vectores del orden de 12 cm en dirección hacia el oeste (Brooks *et al.* 2010).

El terremoto cortical más importante en la región, corresponde al evento de magnitud 6,8 del 30/05/1929 en Villa Atuel (sur de Mendoza). Durante el mismo fueron reportadas intensidades máximas IMM de VIII en la zona

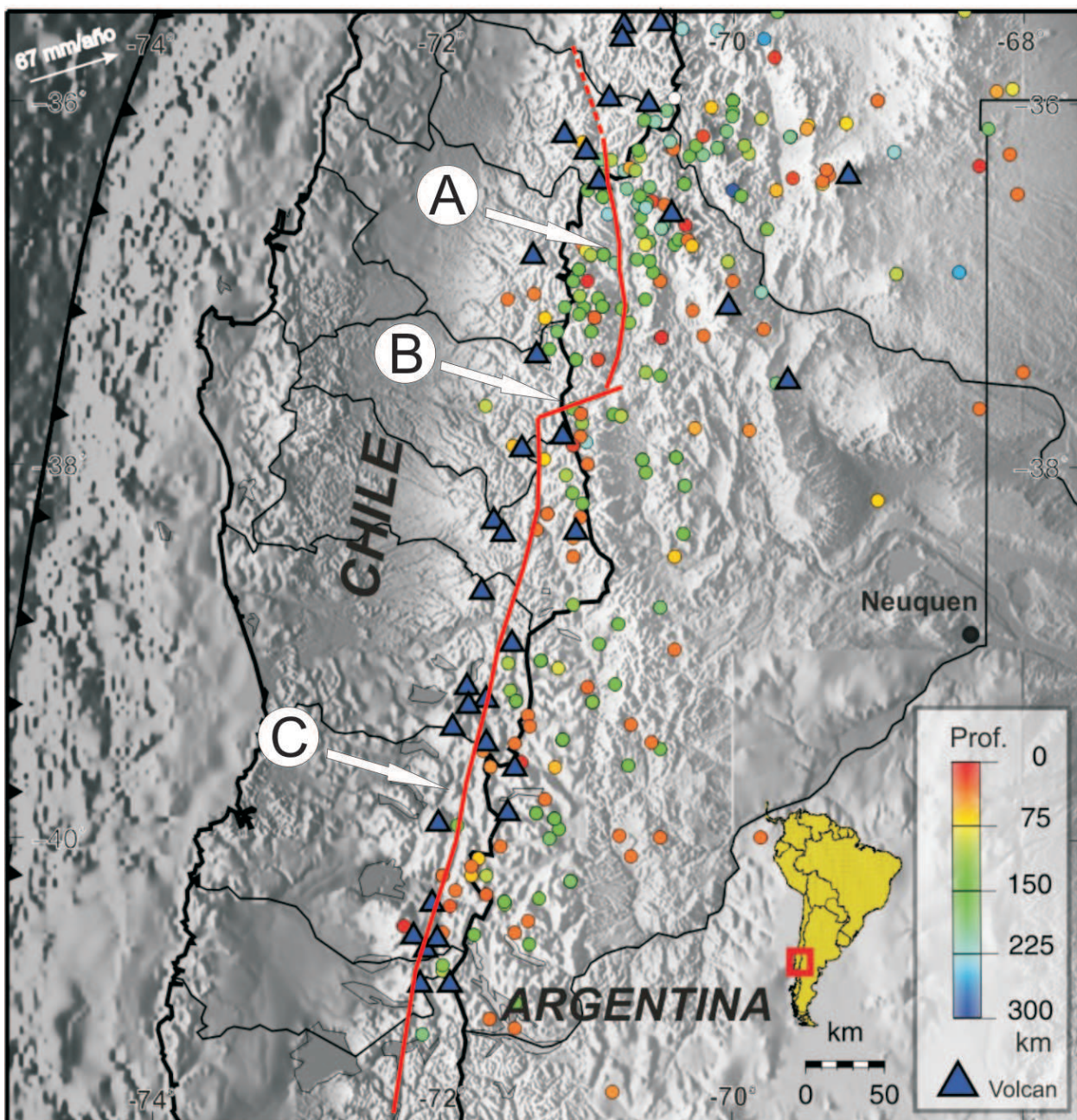
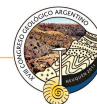


Figura 1: Distribución de la sismicidad histórica e instrumental en el territorio neuquino y regiones aledañas (INPRES 2010). Con trazo esquemático y simplificado se indica en color rojo a los sistemas de fallas Antiñir-Copahue (A), Mandolegüe-Copahue (B) y Liqueñe-Ofqui (C) (Según Folguera *et al.* 2006; 2008 y Rojas Vera *et al.* 2010).



epicentral y de hasta IV dentro del territorio neuquino (INPRES 2010). Otros episodios destacables estuvieron asociados a erupciones volcánicas en la zona limítrofe, como las de los volcanes Descabezado del Maule en 1930, Quizapú en 1932 y otros eventos aislados durante la primera mitad del siglo XX en las regiones de Chos Malal, volcán Lanín y cordillera del Viento (INPRES 2010).

### Fuentes sismogénicas corticales

Para el contexto sismotectónico andino se asume que las estructuras neotectónicas (aquellas con evidencias de actividad durante el Cuaternario) concentran mayores probabilidades de generar movimientos sísmicos futuros. Por tal razón se las identifica como fuentes sismogénicas potenciales (Costa *et al.* 2006a). En el Sistema de Fallas Antiñir-Copahue (SFAC) se han descrito las evidencias más significativas de deformación cuaternaria (Folguera *et al.* 2004; 2006) y se lo considera como la continuación en territorio argentino del Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui en Chile (Fig. 1). Ambos sistemas aparecen vinculados mediante una compleja zona de transferencia en la región del volcán Copahue (Sistema de fallas de Mandolegüe, falla Copahue y otras estructuras asociadas) (Folguera *et al.* 2004; Rojas Vera *et al.* 2010). El SFAC presenta una geometría y cinemática compleja, habiendo predominado desde el Plioceno movimientos transpresivos dextrales, con evidencias geológicas y geomorfológicas de actividad reciente (Holoceno?).

Folguera *et al.* (2008) también han descrito fenómenos vinculados a tectónica de extensión durante el Cuaternario en el *plateau* del volcán Tromen, con desarrollo subsiguiente de fallas que afectan a volcanitas pleistocenas (0.8 Ma).

Otras evidencias de actividad tectónica cuaternaria en la región, están localizadas en el piedemonte surmendocino y en el borde oriental del Bloque de San Rafael (Bastías *et al.* 1993; Cortés *et al.* 1999; Costa *et al.* 2000 y referencias anteriores indicadas en estos trabajos de compilación). Dentro de estas estructuras se destaca la falla Las Malvinas, de presunta vinculación con el terremoto de 1929 en Villa Atuel y de la cual se desconocen precisiones sobre sus parámetros sismogénicos (Cisneros & Bastías 1993; Bastías *et al.* 1993; Costa *et al.* 2006b).

### Fenómenos secundarios asociados a la sismicidad

En los Andes neuquinos han sido reconocidos importantes fenómenos de remoción en masa. La génesis de varios de ellos ha sido vinculada con disparadores sísmicos, principalmente luego del retiro de los glaciares de los valles principales (González Díaz 1988; Escosteguy *et al.* 1999; González Díaz *et al.* 2000; 2001; 2006; González Díaz & Folguera 2005; Hermanns *et al.*, 2003; 2005; Costa & González Díaz 2007, entre otros). Cerca de un centenar de avalanchas de rocas y deslizamientos se concentran entre los 36° y 38° S, con volúmenes que alcanzan hasta 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>. Varios de estos depósitos han obstruido los valles andinos, dando lugar a cuerpos de agua cuya estabilidad puede representar una amenaza para vastas regiones ubicadas aguas debajo de los mismos, independientemente de la ocurrencia de un fenómeno sísmico. Este caso tuvo lugar en la laguna Carrilauquen, ubicada en el curso del río Barrancas en el año 1914, resul-

tando en un desastre de importantes consecuencias (González Díaz *et al.* 2001; Hermanns *et al.* 2003).

### CONCLUSIONES

La provincia del Neuquén se encuentra comprendida en una región de moderada a baja sismicidad, en la que no se registran antecedentes históricos de terremotos destructivos. Los terremotos potencialmente más peligrosos para el territorio neuquino, son aquellos que pudieran vincularse con fuentes sismogénicas localizadas en el oeste de la provincia y regiones andinas aledañas. La capacidad sismogénica de dichas estructuras es menor que en la zona de subducción situada a mayor profundidad en territorio argentino. Sin embargo, su peligrosidad potencial está relacionada a su profundidad somera (< 20 km) y mayor cercanía a poblaciones y obras de infraestructura.

Debido a las tasas de deformación de este sector del retroarco andino, se estima que el intervalo de recurrencia de las fuentes sismogénicas corticales localizadas en el territorio provincial debe ser mucho más prolongado (10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> años?) que el observado para sismos destructivos de subducción. Por tal motivo, la penetración temporal provista por el catálogo sísmico resulta insuficiente para evaluar la capacidad sismogénica de las fallas con actividad reciente en la región. Su análisis debe ser abordado mediante estudios paleosismológicos y redes sísmicas locales de largo despliegue temporal, con el fin de estimar parámetros básicos vinculados con la peligrosidad potencial de las mismas, tales como tasa de movimiento, intervalo de recurrencia, terremoto máximo probable y edad transcurrida desde la última ruptura.

La ocurrencia de avalanchas de rocas y la consecuente obturación de valles y formación de lagos, ha sido interpretada como un efecto secundario asociado a sismos prehistóricos de mayor magnitud que los registrados en el catálogo sísmico.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Barrientos, S. 2007. Earthquakes in Chile. En: Moreno, T. & Gibbons, W. (Eds.): The Geology of Chile: 263-287, Geological Society, London.
- Barrientos, S. & Acevedo, P. 1992. Seismological aspects of the 1988-1989 Lonquimay volcanic eruption (Chile), Journal Volcanol. Geotherm. Res.: 53,73 – 87.
- Barrientos, S., Vera, E., Alvarado, P. & Monfret, T. 2004. Crustal seismicity in Central Chile. Journal of South American Earth Sciences, 16: 759-768.
- Bastías, H., Tello, G., Perucca, P. & Paredes, J. 1993. Peligro sísmico y Neotectónica. En: Ramos, V. (Ed.): Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Mendoza. 12º Congreso Geológico Argentino Relatorio: 228-244.
- Brooks, B., Smalley, R., Bevis, M., Foster, J., Blanco, M., Pollitz, F., Folguera, A., Ramos, V., Cimbaro, S., Alvarado, P., Simons, M., Sladen, A., Distant, C. & Anci, S. 2010. Megathrust Seismic Events and Mountain Building: Andean Backarc Deformation Related to the 27 Feb. 2010 Maule, Chile Earthquake. Abstracts AGU Chapman Conference on Giant Earthquakes and Their Tsunamis. Valparaíso, Viña del Mar, and Valdivia, Chile 17-24 May 2010.
- Charrier, R., Farías, M., Comte, D. & Pardo, M. 2004. Active Tectonic in the Southern Central Andes, a Recent Example: the 28 August, 2004

- Shallow Mw=6.5 Earthquake. Abstracts with Programs AGU Fall Meeting, Eos Transactions, 85(47, Suppl.): S43C-1015.
- Cisneros, H. & Bastías H. 1993. Neotectónica del Borde oriental del Bloque de San Rafael. 12º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 270-276. Mendoza
- Comte, D., Farias, M., Charrier, R. & González, A. 2008. Active tectonics in the central Chilean Andes; 3D tomography based on the aftershock sequence of the 28 August 2004 shallow crustal earthquake. Abstracts with Programs AGU Fall Meeting, Eos, Transactions, 89 (53, Suppl.): T41A-1932.
- Cortés, J., Vinciguerra, P., Yamín, M. & Pasini, M. 1999. Tectónica cuaternaria de la región andina del nuevo Cuyo (28º - 38º LS). En: Caminos R. (Ed.): Geología Argentina. SEGEMAR, Anales 29: 760-778.
- Costa, C., Machette, M., Dart, R., Bastías, H., Paredes, J., Perucca, L., Tello, G. & Haller, K. 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. U. S. Geological Survey Open-File Report 00-0108, 75p., Denver.
- Costa, C., Audemard, F., Becerra, F., Lavenue, A., Machette, M. & París, G. 2006a. An Overview of the Main Quaternary Deformation of South America. Revista Asociación Geológica Argentina, 61: 461-479.
- Costa, C., Cisneros, H., Salvarredi, J. & Gallucci, A. 2006b. H. Nuevos datos y consideraciones sobre la neotectónica del margen oriental del Bloque de San Rafael. Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial No 9: 33-40.
- Costa, C. & González Díaz, E. 2007. Age constraints and paleoseismic implication of rock-avalanches in the Northern Patagonian Andes, Argentina. Journal of South American Earth Sciences, 24: 48-57.
- Escosteguy, L., Geuna, S. & Fauqué, L. 1999. La avalancha de rocas del Moncol, Cordillera Principal, Neuquén. 14º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 67-70, Salta.
- Folguera, A. & Ramos, V. 2009. Collision of the Mocha fracture zone and a <4 Ma old wave of orogenic uplift in the Andes (36°-38°S). Lithosphere, 1: 364-369.
- Folguera, A., Ramos, V., Hermanns, R. & Naranjo, J. 2004. Neotectonics in the foothills of the southernmost central Andes (37°-38°S): Evidence of strike-slip displacement along the Antiñir-Copahue fault zone: Tectonics, 23, TC5008, doi: 10.1029/2003TC001533.
- Folguera, A., Ramos, V., González Díaz, E. & Hermanns, R. 2006. Miocene to Quaternary deformation of the Guañacos fold and thrust belt in the Neuquén Andes between 37° and 37°30' S. En Kay, S. & Ramos, V. (Eds.): Evolution of an Andean Margin: A Tectonic and Magmatic View from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S): Geological Society of America Special Paper 407: 247-266.
- Folguera, A., Bottesi, G., Zapata, T. & Ramos, V. 2008. Crustal collapse in the Andean backarc since 2 Ma: Tremen volcanic plateau, Southern Central Andes (36°40' -37°30' S) Tectonophysics, 459: 140-160.
- Gilbert, H., Beck, S. & Zandt, G. 2006. Lithospheric and upper mantle structure of central Chile and Argentina. Geophysical Journal International, 165: 383-398.
- González Díaz, E. 1988. Mapa inventario de grandes movimientos gravitacionales en la zona comprendida entre los paralelos 36° y 37° S y el meridiano 70° O y el límite argentino-chileno. Dirección Geología Ambiental y Aplicada SEGEMAR (inédito), Buenos Aires.
- González Díaz, E. & Folguera, A. 2005. Reconocimiento y descripción de avalanchas de rocas prehistóricas en el área neuquina delimitada por los paralelos 37° 15' y 37° 30' S y los meridianos 70° 55' y 71° 05' O. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 60: 446-460
- González Díaz, E., Fauqué, L., Giaccardi, A. & Costa, C. 2000. Las lagunas de Varvar Co Campos y Varvar Co Tapia (N del Neuquén, Argentina): su relación con avalanchas de rocas. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 55: 147-164.
- González Díaz, E., Giaccardi, A. & Costa, C. 2001. La avalancha de rocas del Río Barrancas (Co Pelán), N del Neuquén: Su relación con la catástrofe del Río Colorado (29-12-1914). Revista de la Asociación Geológica Argentina, 56: 466-480.
- González Díaz, E., Folguera, A., Costa, C., Wright, E. & Elissondo, M. 2006. Los grandes deslizamientos de la región septentrional neuquina entre los 36°-38° S: Una propuesta de inducción sísmica. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 61: 197-217.
- INPRES. 2010. Listado de terremotos históricos. <http://www.inpres.gov.ar>
- Hermanns, R., González Díaz, E., Folguera, A. & Mardones, M. 2003. Large massive rock slope failures dams, related valley evolution and their association with the tectonic setting in the Argentine and Chilean Andes between 36° and 38°S. 10º Congreso Geológico Chileno, Actas en CD: 1-5, Concepción.
- Hermanns, R., Niedermann, S., González Díaz, E., Fauque, L., Folguera, A., Ivy-Ochs, S. & Kubik, P. 2005 Landslides dams in Argentine Andes. En Abdrakmatov, K. *et al.* (Eds.): Proceedings of the NATO ARW Stability of natural and artificial rock-slide dams: 79-85, Bishkek.
- Rojas Vera, E., Folguera, A., Spagnuolo, M., Giménez, M., Ruiz, F., Martínez, P. & Ramos, V.A. 2010. La neotectónica del arco volcánico a la latitud del volcán Copahue (38° S), Andes de Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65: 204 - 214.