



Potencial Sismogénico de las Fallas Corticales en los Andes chilenos

Isabel Santibáñez^{*1}, José Cembrano¹, Tiaren García¹, Gabriel González², Gonzalo Yañez¹, Gloria Arancibia¹.

¹ Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile.

² Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte.

* email: ivsantibanez@uc.cl

Resumen. Las fallas intraplaca corticales en Chile son capaces de generar terremotos de magnitud al menos $M_w=7$, según los registros instrumentales y estudios paleosismológicos. No obstante la baja tasa de recurrencia de estos sismos, de miles a decenas de miles de años, un sismo cortical puede causar importantes aceleraciones locales del suelo (PGA) y ruptura superficial. Es, por lo tanto, esencial para evaluar el peligro sísmico, considerar el potencial sismogénico de las fallas corticales y la naturaleza de su relación con el ciclo sísmico de subducción.

Palabras Claves: falla cortical, peligro sísmico.

1 Introducción

Chile, por su ubicación en un margen donde convergen las placas de Nazca y Sudamérica, es uno de los mejores laboratorios naturales para descifrar la naturaleza geológica del peligro sísmico. En la zona de subducción Nazca-Sudamérica los segmentos de fallas ‘megathrust’ alcanzan cientos de kilómetros de longitud. Allí, se pueden producir terremotos de magnitudes superiores a 7,5, con tiempos de recurrencia entre 80 y 120 años, así como terremotos de magnitudes superiores a 8,5 cada 250 a 500 años (e.g. Comte et al., 1986; Barrientos, 2007).

La zona de subducción está fuertemente segmentada longitudinalmente, mostrando diferencias en el ángulo de subducción y el grado de acoplamiento entre placas (Baranzagi e Isacks, 1976), lo que determina diferentes estilos de deformación heterogénea a lo largo Los Andes (e.g. Dewey y Lamb, 1992; Yañez y Cembrano, 2004), incluyendo dominios compresionales, extensionales y de rumbo (e.g. Lavenu et al., 2000, Ramos, 2010).

2 Evaluación del peligro sísmico en Chile

Los tipos de terremotos o fuentes sísmicas que afectan al territorio chileno corresponden a: interplaca o de subducción (0-60 km de profundidad), intraplaca de profundidad intermedia (60-200 km; Campos y Kausel, 1990) y superficial o intraplaca cortical (<30 km, e.g. Leyton et al., 2010).

La mayoría de los terremotos se concentran en las falla interplaca de subducción y han causado grandes

catástrofes en Chile con numerosas víctimas y/o elevadas pérdidas económicas. Estos terremotos son los más frecuentes y alcanzan las mayores magnitudes con respecto a los otros tipos de sismos.

Es por esto que la Norma Chilena de Diseño Sísmico se ha basado en los terremotos de subducción para la macrozonificación del territorio y la determinación de los coeficientes de seguridad estructural (NCh-INN, 2011; Barrientos, 1980). De hecho, el mapa de zonificación del peligro sísmico chileno no considera otros tipos de terremotos que localmente podrían superar significativamente la aceleración máxima del suelo (PGA) calculada solamente a partir de los terremotos interplaca.

3 Terremotos intraplaca corticales

Las fallas corticales intraplaca, a su vez, tienen tiempos de recurrencia más largos (miles de años) y producen terremotos de magnitudes moderadas (e.g. M_w 6,2 Aysén, 2007). Sin embargo, su peligrosidad puede ser más significativa por tener hipocentros más superficiales y eventualmente generar ruptura superficial.

En Chile se registran sismos corticales a lo largo de toda su extensión y en sus diferentes contextos tectónicos regionales y locales. Tal como se aprecia en la Tabla 1, los mayores sismos corticales registrados en Chile desde el 2000 y el sismo recalculado de Las Melosas del siglo pasado, tuvieron magnitud M_w entre 6 y 7. La profundidad hipocentral, en tanto, fue menor a 20 km en todos los casos, si bien no se documentó ruptura superficial en ninguno de estos sismos.

Por otro lado, diversos estudios neotectónicos recientes muestran la existencia de rasgos geomorfológicos que revelan la ruptura en superficie de fallas corticales. Evidencias conspicuas de aquello son los escarpes de falla normal y las superficies aluviales cuaternarias desplazadas en el Sistema de Falla Atacama (SFA) en el norte de Chile (e.g. Marquardt, 2005; González et al., 2006; Cortés et al., 2012). En el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO), de movimiento principal de rumbo dextral, se encuentran evidencias de escarpes submarinos bien preservados de fallas que deforman sedimentos del fondo del fiordo Aysén (Vargas et al., 2013).

Trabajos morfotectónicos y paleosismológicos indican que las fallas Mejillones y Salar del Carmen del SFA han experimentado terremotos de magnitud $M_w \sim 7$ desde los últimos 35.000 años, con los últimos movimientos dados hace pocos miles de años. Las estimaciones referidas al tiempo de retorno de eventos $M_w \sim 7$ en estas fallas, aunque de robustez limitada, permiten determinar recurrencias del orden de miles a, probablemente, decenas de miles de años (e.g. González et al., 2008, Vargas et al., 2011; Cortés et al., 2012).

4 Discusión y Conclusiones

Para entender la real significación del peligro sismogénico de las fallas corticales es fundamental comprender su comportamiento en el contexto del ciclo de terremotos de subducción, ya que fallas corticales que están orientadas de manera óptima con respecto a los campos de esfuerzos intersísmico o cosísmico, pueden ser reactivadas (e.g. Farías et al., 2011; Aron et al., 2013). Particularmente este sería el caso de aquellas fallas corticales orientadas de manera óptima y que se someten a altas tasas de deformación, condición que puede ser alcanzada cosísmicamente con grandes terremotos de subducción. En contraste, durante el período intersísmico, la tasa de deformación se mantiene relativamente baja y luego la reactivación de fallas orientadas de manera óptima parece menos probable. Sin embargo, la naturaleza precisa de la relación fallas corticales y ciclo sísmico de zonas de subducción sigue siendo poco conocida.

La principal significación de estos diferentes modelos tectónicos de reactivación de fallas y su amplia gama de tasas de deslizamiento es que la evaluación del peligro geológico de fallas corticales está lejos de ser trivial: muchas estructuras consideradas activas utilizando la clasificación tradicional pueden no generar terremotos significativos en miles de años de acuerdo a sus tiempos de recurrencia, mientras que otras fallas cuaternarias menos conocidas, que no han registrado sismicidad instrumentalmente, podrían desencadenar terremotos de magnitud $M_w=7$. Además, segmentos de falla que han generado terremotos de forma independiente el uno del otro, con el tiempo pueden eventualmente ser capaces de combinarse en un solo segmento de ruptura y generar un terremoto de mayor magnitud.

Agradecimientos

Se agradece a los proyectos FONDEF +Andes D10I1027, FONDAP Cigiden 15110017, FONDECYT 1140846 y FONDAP Cega 15090013.

Referencias

- Alvarado, P.; Barrientos, S.; Sáez, M.; Astroza, M.; Beck, S. 2009. Source study and tectonic implications of the historic 1958 Las Melosas crustal earthquake, Chile, compared to earthquake damage. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 175, 26–36.
- Aron, F.; Allmendinger, R.W.; Cembrano, J.; González, G.; Yáñez, G. 2013. Permanent fore-arc extension and seismic segmentation: Insights from the 2010 Maule earthquake, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 118, 1–16.
- Baranzagi, M.; Isacks B.L. 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca Plate beneath South America. *Geology* No.4, p. 686–692.
- Barrientos, S. 1980. Regionalización sísmica de Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Mención Geofísica. Universidad de Chile, Santiago.
- Barrientos, S. 2007. Earthquakes in Chile. En: T. Moreno y W. Gibbons (Eds.). *The Geology of Chile*. London, Geological Society. pp. 263-287.
- Campos J.; Kausel, E. 1990. The large 1939 intraplate earthquake of southern Chile. *Seis. Res. Lett.*, 61.
- Comte, D.; Eisenberg, A.; Lorca, E.; Pardo, M.; Ponce, L.; Saragoni, R.; Singh, S.K.; Suarez, G. 1986. The 1985 Central Chile Earthquake: A Repeat of Previous Great Earthquakes in the Region? *Science*, 233 (4762), 449-453.
- Cortés, J.; González, G.; Binnie, S.A.; Robinson, R.; Freeman, S.P.H.T.; Vargas, G. 2012. Paleoseismology of the Mejillones Fault, northern Chile: Insights from cosmogenic ^{10}Be and optically stimulated luminescence determinations, *Tectonics*, 31, TC2017.
- Dewey, J.F.; Lamb, S.H. 1992. Active Tectonics of the Andes. *Tectonophysics* No.205, p. 79–95.
- Fariás, M.; Comte, D.; Roecker, S.; Carrizo, D.; Pardo, M. 2011. Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence. *Tectonics*, 30, TC6010.
- González, A. 2008. Análisis estructural entre los valles del río Tinguiririca y Teno, Cordillera Principal de Chile Central: Microsismicidad y Geología Superficial. Memoria para optar al título de Geóloga, Universidad de Chile, Santiago.
- González, G.; Gerbault, M.; Martinod, J.; Cembrano, J.; Carrizo, D.; Allmendinger, R.; Espina, J. 2008. Crack formation on top of propagating reverse faults of the Chuculay Fault System, northern Chile: Insights from field data and numerical modelling. *Journal of Structural Geology* 30, 791-80.
- González, L.; Dunai, T.; Carrizo, D.; Allmendinger, R. 2006. Young displacements on the Atacama Fault System, northern Chile from field observations and cosmogenic ^{21}Ne concentrations. *Tectonics*, 25(3).
- Lavenu, A.; Thiele, R.; Machette, M.; Dart, R.; Bradley, L.A.; Haller, K. 2000. Maps and database of quaternary faults in Bolivia and Chile. USGS Open File Report 00-283: 46.
- Legrand, D.; Barriento, S.; Bataille, K.; Cembrano, J. 2011. The fluid-driven tectonic swarm of Fjordo Aysen, Chile (2007) associated

with two earthquakes ($M_w=6.1$ and $M_w=6.2$) within the Liquiñe-Ofqui Fault Zone, *Continental Shelf Research* 31, 154-161.

Legrand, D.; Delouis, B.; Dorbath, L.; David, C.; Campos, J.; Maequez, L.; Thompson, J.; Comte, D. 2007. Source parameters of the $M_w = 6.3$ Aroma crustal earthquake of July 24, 2001 (northern Chile), and its aftershock sequence. *Journal of South American Earth Sciences* 24, 58–68.

Leyton, F.; Ruiz, S.; Sepúlveda, S. 2010. Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile Central. *Revista Geológica de Chile*.
Marquardt C. 2005. Déformations néogènes le long de la côte nord du Chile ($23^\circ - 27^\circ S$), avant-arc des Andes Centrales. Unpublished PhD thesis, Université Toulouse III, Paul Sabatier, Toulouse, France, 212 pp.

Mora, C.; Comte, D.; Russo, R.; Gallego, A.; Mocanu, V. 2010. Aysén seismic swarm (January 2007) in southern Chile: analysis using Joint Hypocenter Determination. *Journal of Seismology*, 14, 4, 683-691.

NCh-INN. 2011. NCh 433 Norma Chilena 433.Of 1996, mod.2009—Decreto N°117, 2011. Diseño Sísmico de Edificios. Instituto Nacional de Normalización, INN-Chile.

Ramos, V.A. 2010. The tectonic regime along the Andes: Present-day and Mesozoic regimes. *Geological Journal*, Vol. 45, 1, 2–25.

Sepúlveda, S.; Astroza, M.; Kausel, E.; Campos, J.; Casas, E.; Rebolledo, S.; Verdugo, R. 2008. New findings on the 1958 Las Melosas earthquake sequence, Central Chile: implications for seismic hazard related to shallow crustal earthquake in subduction zones. *J. Earthquake Eng.* 12, 432–455.

Vargas, G.; Palacios, C.; Reich, M.; Luo, S.; Shen, C.; González, G. 2011. U-series dating of co-seismic gypsum and submarine paleoseismology of active faults in Northern Chile (23S), *Tectonophysics*, 497, 34–44.

Vargas, G.; Sofia, R.; Sepúlveda, S.; Lahsen, A.; Thiele, R.; Townley, B.; Padilla, C.; Rauld, R.; Herrera, M.J.; Lara, M. 2013. Submarine earthquake rupture, active faulting and volcanism along the major Liquiñe-Ofqui Fault Zone and implications for seismic hazard assessment in the Patagonian Andes. *Andean Geology* 40 (1): 141-171.

Yañez, G.; Cembrano, J. 2004. Role of viscous plate coupling in the late Tertiary Andean tectonics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 109, B2.

Tabla 1. Ejemplos de terremotos intraplaca corticales

Localidad	Año	Magnitud M_w	Profundidad (km)	Referencia
Las Melosas	1958	6,3	5,0 – 9,0	Alvarado et al., 2009
		6,9-6,7-6,8		Sepúlveda et al., 2008
Aroma	2001	6,3	~5,0	Legrand et al., 2007
Curicó	2004	6,5	4,7	González, 2008
Aysén	2007	6,2	< 8,0	Mora et al, 2010
			4,0 – 12,0	Legrand et al., 2011
Pichilemu	2010	6,9	~12,9	Farías et al., 2011
		7,0	16,3	Aron et al., 2013