

Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza

Seismic Risk due to Surface Rupture: Revision of Legislations from Different Seismic Regions of the World. Proposal for Mendoza

José Mescua^{1,2}, Laura Giambiagi¹

jmescua@mendoza-conicet.gob.ar, lgiambiagi@mendoza-conicet.gob.ar

¹ Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT Mendoza, CONICET

² Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo

Resumen

El Gran Mendoza se encuentra en una región atravesada por fallas activas que han producido rupturas superficiales en el pasado y que pueden volver a producirla en el futuro, lo que constituye un peligro para construcciones realizadas sobre la traza de falla. La normativa de construcción sismorresistente vigente en Argentina es la establecida a nivel nacional, y no incluye el peligro por ruptura superficial, si bien sugiere incluirlo en el futuro de contarse con estudios que lo permitan. Con el objetivo de desarrollar regulaciones frente al peligro por ruptura superficial en Mendoza, en este trabajo se describen y analizan tres casos de estudio (California, Estados Unidos; Costa Rica; y Nueva Zelanda) cuyas experiencias pueden ser útiles para determinar criterios de zonificación. Teniendo en cuenta las lecciones aprendidas en estos tres países y las particularidades del caso mendocino, se busca contribuir a lograr que la región sea más resiliente frente al peligro sísmico. La primera medida necesaria para esto es un programa sistemático de mapeo de fallas activas a escala adecuada. Relacionando los mapas con el uso de tierra (urbano, rural, de interfase), pueden determinarse los tipos de construcciones permitidos y no permitidos para evitar daños por ruptura superficial.

Palabras clave: Fallas activas, ruptura superficial, ordenamiento territorial

Abstract

The Great Mendoza is located in a region where active faults have produced surface ruptures in the past, and that may re-produce them in the future, which is a danger for constructions carried out on the fault trace. The regulations of seismoresistant construction in force in Argentina are the ones established at national level, and do not include the danger due to surface rupture, even though it is suggested to be included in the future if there are studies that allow it. With the purpose of developing regulations against danger caused by surface rupture in Mendoza, this work describes and analyzes three case studies (California, United States; Costa Rica; and New Zealand), experiences that can be useful to determine zoning. Taking into account the lessons learned in these three countries and the particularities of the Mendoza case, the aim of this work is to contribute to making the region more resilient in facing seismic risk. The first necessary measure for this is a systematic program of active fault mapping at an appropriate scale. The types of constructions allowed and not allowed to avoid damages by surface rupture can be determined by relating the maps to the land use (urban, rural, interphase).

Keywords: active faults, surface rupture, land-use planning

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

Introducción

La normativa de construcción sismorresistente más reciente en Argentina es el Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes INPRES-CIRSOC 103 (INPRES, 2005a, b, c, d, 2013a, b). Esta normativa determina las características constructivas de edificios y otras obras de ingeniería en función del tipo de construcción y de la aceleración de suelo máxima esperada para cada región. Ésta última se basa en la Zonación de Peligro Sísmico realizada por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES, www.inpres.gov.ar). Es decir que las normas están diseñadas para que las obras puedan ser resistentes frente al paso de ondas sísmicas, en función de las intensidades máximas esperadas en cada región. La normativa también contempla algunos efectos asociados a la actividad sísmica como la licuación de suelos.

Sin embargo, en regiones sísmicamente activas, estos no son los únicos factores de peligro. En zonas atravesadas por fallas activas, el peligro de ruptura superficial, producido por fallas que durante un sismo se mueven hasta la superficie y deforman el terreno, puede ser elevado. Generalmente, la ruptura superficial se asocia a sismos de poca profundidad y magnitud mayor a $M=6$ (Wells y Coppersmith, 1994).

En el caso del Gran Mendoza, el peligro por ruptura superficial es importante ya que la ciudad se construyó en una zona con evidencias de ruptura superficial en el pasado. Por otro lado, la constante expansión del Gran Mendoza hace que zonas atravesadas por fallas activas puedan ser incorporadas a la ciudad. De esta manera, el hecho de que la ruptura superficial no sea tenida en cuenta en la normativa de construcción sismorresistente, ni en el ordenamiento territorial, implica un riesgo para las construcciones y para los habitantes de la ciudad. Lamentablemente, el conocimiento sobre la traza superficial de las fallas en el sector urbano y suburbano de Mendoza es hasta el momento incompleto (González *et al.*, 2002). La construcción de la ciudad produjo modificaciones en la topografía que hacen difícil determinar la ubicación de las escarpas producidas por fallas, y la cobertura urbana dificulta la obtención de datos geológicos tanto de superficie como del subsuelo. Este conocimiento incompleto, que también se observa en otras ciudades del país, parece ser la razón de que este factor no sea tenido en cuenta en la normativa. Como se señala en los Comentarios a la Parte I del Reglamento INPRES CIRSOC 103: "Con el avance de estudios de microzonificación y de fallamiento, así como de la tasa de deformación de las fallas (...) podrán ponerse en vigencia factores de modificación por la proximidad a fallas, expresados en mapas específicos, como sucede, por ejemplo, en Estados Unidos" (INPRES, 2013b).

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

Los espectros de diseño que determinan la aceleración máxima esperada en cada región (capítulo 3, sección 5 de la Parte I del Reglamento) incluyen dos coeficientes de proximidad a fallas, denominados N_A , para la parte del espectro sensible a aceleración, y N_V , para la parte del espectro sensible a velocidad. Estos coeficientes fueron incluidos para dar la posibilidad de que las autoridades encargadas de controlar la aplicación de estas normas puedan tener en cuenta el efecto de directividad (comentarios al Capítulo 3.5 de la Parte I del Reglamento). Este efecto corresponde a un pulso de movimiento de corta duración y gran amplitud producido en localidades ubicadas en la dirección de propagación de la ruptura a lo largo de la falla, debido a que esta propagación se produce a velocidad similar a la de las ondas sísmicas (Somerville *et al.*, 1997). Estos coeficientes también podrían usarse para ruptura superficial, aplicando valores muy altos en la cercanía inmediata de las fallas activas. De esta manera, podría adaptarse el Reglamento para Construcciones Sismorresistentes para incluir la prevención contra ruptura superficial. En la normativa nacional vigente, los coeficientes se aplican con un valor constante para cada una de las zonas definidas en la Zonificación de Peligro Sísmico. Las autoridades locales (municipios), que son quien determina los requerimientos para la construcción, pueden modificar los coeficientes para tener en cuenta la proximidad a fallas si consideran que es necesario. En la práctica, ningún municipio de Mendoza utiliza estos coeficientes, ya que ni siquiera cuentan con mapas oficiales de la ubicación de las fallas que permitan aplicarlos.

Otro enfoque posible contra el peligro por ruptura superficial consiste en el establecimiento de zonas de seguridad alrededor de las fallas en las que no se permiten las construcciones para ocupación humana, a partir de una reglamentación independiente de la normativa de construcción sismorresistente. Este enfoque es el que se ha aplicado en varias regiones del mundo como California (Estados Unidos), Costa Rica, China, entre otros.

La implementación de normas contra el peligro sísmico por ruptura superficial no es una problemática exclusiva de Mendoza, sino que se da en regiones sísmicamente activas alrededor del mundo. La comparación con casos de otros países puede ayudar a generar una propuesta viable para los municipios del Gran Mendoza y a nivel provincial, así como en otras ciudades del país que se encuentren en situación similar. Este trabajo busca avanzar en este sentido mediante el análisis de la situación de tres regiones diferentes. La normativa californiana es una de las primeras en ser implementadas, y lleva alrededor de cuarenta años de aplicación. El caso de Costa Rica corresponde a una legislación reciente, en un país en el que no se cuenta con

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

cartografía oficial sobre las fallas a escala adecuada, lo que lo hace de interés por su semejanza con la situación argentina. Por último, en Nueva Zelanda la normativa está en proceso de desarrollo, y las propuestas de implementación de zonas de seguridad en zonas urbanas se han encontrado en algunos casos con resistencia de la población, por lo que puede utilizarse la experiencia de ese país a la hora de pensar normativas en regiones ya construidas.

Casos de estudio: legislación en otras regiones

California, Estados Unidos

El Estado de California, Estados Unidos, cuenta con legislación contra el peligro de ruptura superficial desde el año 1972, cuando se sancionó la ley conocida como *Alquist-Priolo Act*. La normativa se desarrolló a partir del terremoto de San Fernando del 9 de febrero de 1971, de magnitud 6,6 en la escala de Richter. Este sismo, que afectó al sector norte de Los Angeles causando 64 víctimas fatales y pérdidas económicas por alrededor de mil millones de dólares, se caracterizó por significativos daños asociados a ruptura superficial (Joint Panel on the San Fernando Earthquake, 1971). Los relevamientos realizados inmediatamente después del sismo indicaron que la zona de ruptura superficial tuvo 15 km de largo, y desplazamientos máximos de alrededor de 1 m verticales y 2,5 m horizontales (United States Geological Survey, 1971; Sharp, 1975). Un informe realizado por el Servicio Geológico de Estados Unidos señaló que: (a) la zona de ruptura superficial estuvo específicamente asociada con los daños más extremos producidos por el terremoto, incluyendo la mayor concentración de edificios señalados como inseguros, además de otros que sufrieron daños estructurales sin ser clasificados como inseguros; (b) que esa concentración se debió a los grandes desplazamientos permanentes horizontales y verticales registrados en la zona de ruptura superficial de las fallas; (c) que la ruptura superficial siguió escarpas pre-existentes, indicando la reactivación de fallas que habían causado terremotos en el pasado geológico; por lo tanto, (d) que las zonas de ruptura superficial podrían haber sido determinadas mediante estudios previos al terremoto; y que (e) la topografía no era el único criterio que debía utilizarse sino que un completo estudio geofísico y geológico era necesario (United States Geological Survey, 1971). En vista de esto, se desarrolló una normativa para evitar que se repitieran los efectos destructivos en el futuro, que se denominó *Alquist-Priolo Act*, con el objetivo de proveer criterios y políticas para asistir a las ciudades, condados y agencias estatales en el ejercicio de su responsabilidad de prohibir la locación de desarrollos y estructuras de ocupación humana a través de la traza de fallas activas.

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

El primer paso determinado por la ley fue la confección de mapas de las fallas “suficientemente activas y bien definidas como para constituir un peligro potencial a las estructuras debido al fallamiento superficial” (Alquist-Priolo Act, art. 2622). La realización de los mapas se hizo en orden de prioridad teniendo en cuenta la ubicación de las fallas principales y las zonas de expansión urbana, finalizando el programa de mapeo en 1991. Esta tarea fue encargada al Geólogo del Estado (el director del Servicio Geológico de California), con un plazo de 90 días para una revisión de cada mapa por parte de todas las ciudades, condados y agencias estatales involucradas. Después de esta revisión, el Geólogo del Estado confeccionó los mapas oficiales, los cuales deben ser continuamente actualizados en función de la nueva información geológica que se vaya produciendo. Se definió la escala 1:24.000 para coincidir con los mapas geológicos oficiales realizados por el Servicio Geológico de Estados Unidos.

Por otro lado, se establece que el Consejo de Minas y Geología de California (*State Mining and Geology Board*) es el encargado de desarrollar las políticas y criterios específicos que determinan la aprobación o rechazo de proyectos. Las ciudades y condados deben requerir que cada proyecto presente un informe geológico definiendo el peligro de ruptura superficial y basarse en esas políticas y criterios para aprobarlo o rechazarlo. La autoridad local puede dar excepciones en determinados casos, pero esto está sujeto a la aprobación final del Geólogo del Estado. Se especifica asimismo que las autoridades locales pueden establecer criterios más estrictos que los indicados en la ley, y determinar no otorgar las excepciones permitidas por la ley.

Los criterios necesarios para la aplicación de la *Alquist-Priolo Act*, establecidos por el Consejo de Minas y Geología de California, fueron incorporados al Código de Regulaciones (*California Code of Regulations*) en enero de 1979. Los criterios determinan que “ninguna estructura de ocupación humana (...) será permitida a través de la traza de una falla activa. Además, como el área dentro de 50 pies (15 m) de dichas fallas activas se presume como subyacente por segmentos activos de la falla a menos que sea demostrado lo contrario por una investigación geológica apropiada (...), ninguna estructura será permitida en esta área” (*California Code of Regulations*, Title 14, Division 2, Chapter 8, Subchapter 1, Article 3). Entre las definiciones importantes determinadas en estos criterios, se establece que se considerará “falla activa” a aquellas que hayan tenido desplazamiento superficial durante el Holoceno (en los últimos 11.000 años).

El relativamente largo tiempo desde la sanción de la normativa permitió que se realicen evaluaciones sobre las dificultades para su aplicación y sobre su efectividad. El estudio de Reitherman y Leeds (1991) evaluó posibles modificaciones a la *Alquist-*

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

Priolo Act entre los posibles extremos de aumentar su autoridad y alcance, y abolirla. La conclusión general fue que era efectiva para los objetivos planteados, si bien se sugirieron pequeñas modificaciones en su aplicación. A partir de las recomendaciones de ese informe y de un pedido de interpretación de las regulaciones de la ciudad de Camarillo, desde 2007 se comenzó un proceso de discusión con el fin de actualizar las regulaciones, para lo que se reunió un Comité Asesor Técnico (Technical Advisory Committee) conformado por especialistas. En su informe de abril de 2015 explican que el proceso de revisión se vio retrasado por problemas presupuestarios (SMGB, 2015). Sin embargo, varios miembros del Comité publicaron revisiones sobre distintos aspectos de la normativa en un número especial sobre ruptura superficial de la revista *Environmental and Engineering Geoscience* (Cato, 2010). Desde que se efectivizó la aplicación de estas regulaciones, se produjeron en California 24 sismos con ruptura superficial, aunque ninguno afectó áreas urbanas. En general las zonas con ruptura superficial correspondieron a zonas de falla incluidas en los mapas de la *Alquist-Priolo Act*. Sin embargo, se detectaron dificultades para reconocer áreas con peligro de ruptura superficial en zonas complejas como terminaciones de fallas, zonas de relevo entre dos fallas y para fallas con muy baja tasa de desplazamiento (Bryant, 2010). Treiman (2010) realizó una revisión de estas dificultades para determinar si una falla es peligrosa, remarcando la necesidad de tener en cuenta la información a distintas escalas para observar la complejidad de las zonas de falla. Schlemmon (2010) cuestiona el límite arbitrario de 11.000 años utilizado para definir qué fallas se toman como activas. Según este autor, idealmente no debería utilizarse un límite cronológico sino que debería estudiarse cada caso y determinar si una falla es peligrosa en función de la información geológica. De acuerdo con este criterio, sugiere reemplazar el término conflictivo “falla activa” por “falla peligrosa”. Sin embargo, el mismo autor acepta que no determinar un criterio claro y general puede ser complicado ya que daría lugar a subjetividades y posibles dificultades legales. En base a la experiencia de campo y las características geológicas de California, propone un límite entre 4.000 y 6.000 años para definir fallas peligrosas. Borchardt (2010) remarca la necesidad de determinar el ancho las zonas de seguridad en función de las características geológicas de cada sitio, especialmente teniendo en cuenta la edad y litología de los materiales afectados y el grado de evolución de la falla, ya que esto determina qué tan localizada será la deformación al producirse la ruptura superficial. Sugiere evitar la determinación de zonas de seguridad sólo en función de un número arbitrario dictaminado por las regulaciones, siempre que se cuente con la información para utilizar un criterio más apropiado. También propone permitir medidas de mitigación estructural para fallas secundarias para las que se estiman desplazamientos por ruptura superficial de

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

menos de 30 cm, de acuerdo con las propuestas de Sexton (2008) y Bray (2009). Sexton y Blake (2010) discuten la posibilidad de permitir estas técnicas de mitigación, señalando que esto sería beneficioso sólo si los estudios requeridos para determinar que una falla es menos peligrosa son posibles y económicamente accesibles, y si las medidas de mitigación no son muy caras. En caso contrario, puede ser mejor mantener las regulaciones tal como están.

En resumen, estas revisiones coinciden en el que la normativa cumple su función adecuadamente, y se estima que cuando un sismo con ruptura superficial se produzca en un área urbana de California, las pérdidas tanto económicas como de vidas sean mucho menores que si las regulaciones no estuvieran en funcionamiento. Hasta el momento no se ha determinado modificaciones específicas que podrían mejorar la normativa (SMGB, 2015).

Costa Rica

La legislación contra ruptura superficial en Costa Rica fue incorporada muy recientemente a nivel nacional. Forma parte de los planes reguladores de uso del suelo, a realizar por cada municipio, así como de las evaluaciones de impacto ambiental requeridas para el desarrollo de diferentes obras, actividades y proyectos. Se encuentra implementada dentro del Manual de Instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, Parte III (MINAE, 2006), en el que se incluye un "Protocolo para la zonificación de uso del suelo sobre y en las cercanías de fallas geológicas activas". El Protocolo confeccionado es una adaptación de la normativa californiana, desarrollada sobre la base de que Costa Rica no cuenta con cartografía geológica oficial de detalle (Astorga, 2013). Por lo tanto, el Protocolo requiere que los informes de impacto ambiental requeridos para diferentes proyectos incluyan un estudio de terreno realizado por un geólogo, con el apoyo de publicaciones geológicas sobre el área, imágenes de sensores remotos y otros métodos, con el objetivo de determinar la presencia de fallas, evaluando su grado de actividad según tres categorías. Se clasifican como fallas activas aquellas que presentan desplazamiento holoceno (en los últimos 11.000 años), potencialmente activa cuando presenta desplazamiento cuaternario (últimos 1,6 millones de años) o inactiva. Cuando el relevamiento indica la presencia de una falla que no cuenta con estudios detallados, se establece una zona de seguridad de 50 m de ancho a ambos lados de la falla o de 100 m en el caso de zonas de falla complejas, que debe registrarse en un mapa y a la que se aplican restricciones para el uso de suelo hasta tanto se hagan estudios más detallados. Estos últimos consisten en un análisis detallado geológico, geomorfológico,

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

paleosísmico y sismológico, mediante el cual se completa una ficha técnica y se recalcula el ancho de la zona de seguridad (Astorga, 2013).

El Protocolo establece que “ninguna estructura de ocupación humana será permitida a ser emplazada sobre la traza de una falla geológica activa. Adicionalmente, como el área dentro de los 15 metros de tal falla activa podría estar presumiblemente infrayacida por ramificaciones activas de esa falla (...) ninguna estructura podría ser permitida en esta área, salvo que exista un criterio geológico - neotectónico específico y local que reduzca dicha zona hasta un mínimo de 10 metros” (MINAE, 2006). Para zonas de falla con deformación no localizada se indica que “el área de restricción para el desarrollo de estructuras de ocupación humana abarcará como mínimo el ancho de la zona de deformación probada por el estudio geológico (...) y además, un área de 15 metros, que puede ampliarse según criterio técnico del geólogo que realiza la investigación” (MINAE, 2006). Se hace una salvedad para infraestructura estratégica en caso de que fuese materialmente imposible evitar que la obra de infraestructura atravesase una zona de falla activa, en cuyo caso “se procederá a establecer un parámetro de diseño y construcción más estricto a fin de minimizar los eventuales daños, y además se contemplará un plan de mitigación de desastre que deberá ser aplicado por la autoridad correspondiente cuando la obra esté en uso” (MINAE, 2006).

La regulación no es retroactiva, por lo que no se aplica a construcciones existentes. Pero sí determina pasos a seguir en caso de que un estudio revele que existen estructuras construidas sobre fallas activas. La autoridad municipal debe informar a los propietarios de la situación. Un especialista debe proveer a los ocupantes de un plan de emergencia, así como recomendar medidas técnicas de reforzamiento estructural y prevención cuando esto sea posible. Para no agravar el problema, se promoverá que a futuro no se den ampliaciones y se desmotivará de la ocupación de los terrenos ubicados en el área de seguridad, si bien no se establecen pasos específicos para esto (MINAE, 2006).

Cabe señalar que la implementación del Protocolo, y de las Evaluaciones de Impacto Ambiental en general, se ha encontrado con dificultades tanto desde la realización de las evaluaciones por parte de los consultores, como en la revisión de estos estudios por parte del organismo oficial que la tiene a cargo, la Secretaría Técnica Nacional Ambiental. Por ejemplo, muchas veces los relevamientos no se realizan a la escala adecuada (máximo 1:10.000, Astorga, 2016), y el organismo de control acepta y aprueba las evaluaciones aunque no se cumplan todos los puntos (Astorga, 2016). Esto resalta la importancia del control que el estado debe realizar una vez que las regulaciones están en funcionamiento para que éstas cumplan su objetivo.

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

Nueva Zelanda

Desde 1991, la legislación de Nueva Zelanda incluye un Acta de Manejo de Recursos (*Resource Management Act*) que brinda un marco general para las leyes relacionadas al uso de tierras, aire y agua. En el Acta se determina que el manejo de riesgos generados por peligros naturales es un asunto de importancia nacional, y se señala como función de los Consejos Regionales (las autoridades locales de mayor jerarquía) evitar o mitigar los peligros naturales. Para esto deben delinear la política regional, producir planes regionales, coordinar investigaciones de peligros naturales, y trabajar con las autoridades locales de menor jerarquía (municipales) para manejar el riesgo. Los municipios ("*district councils*") deben recopilar la información y encargar las investigaciones necesarias para establecer un plan de distrito que controle los usos de tierra permitidos. Por lo tanto, se prevé una coordinación a nivel local y regional para cumplir la función de prevención y mitigación de peligros naturales. Por otro lado, el Acta señala que para realizar cualquier actividad que pueda afectar recursos es necesario presentar una evaluación de efectos ambientales que debe especificar "cualquier riesgo al vecindario, la comunidad o al ambiente por peligros naturales o instalaciones peligrosas" (*Resource Management Act*, 1991).

En 2001, el Comisionado Parlamentario para el Ambiente de Nueva Zelanda publicó un informe a partir de preocupaciones del público sobre la habilidad de las autoridades locales para determinar usos de tierra y desarrollos sobre fallas activas, indicando que era necesaria una guía práctica para poder implementar medidas de reducción de los riesgos asociados a ruptura superficial. Esta guía fue confeccionada por el Ministerio de Ambiente con la colaboración del Instituto de Ciencias Geológicas y Nucleares de Nueva Zelanda (Kerr *et al.*, 2003). Si bien esta guía no forma parte de la legislación, es un primer paso para la elaboración de una normativa legal contra el peligro por ruptura superficial de fallas, y tiene el objetivo de asistir a quienes regulan el uso de tierras, a científicos, consultores y a constructores para evitar o mitigar el peligro por ruptura superficial. Su aplicación depende de las autoridades locales.

La guía parte de cuatro principios según el uso actual de la tierra en cada zona (Kerr *et al.*, 2003): (1) recolectar información precisa sobre las fallas activas; (2) planear el uso de tierras antes de su desarrollo y subdivisión para evitar el peligro por ruptura superficial; (3) utilizar un enfoque basado en el riesgo en áreas en desarrollo; y (4) comunicar el riesgo en áreas ya construidas.

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

El primer principio detalla que las fallas activas deben estar precisamente ubicadas, para lo que es necesaria la confección de mapas a la escala adecuada (1:10.000, Kerr *et al.*, 2003).

El segundo principio se aplica mediante el establecimiento de zonas de seguridad (*fault avoidance zones*), para las que se determina un mínimo de 20 metros a cada lado de la falla activa, a menos que estudios detallados indiquen que este valor puede reducirse. Una vez definida la zona de seguridad, en áreas no desarrolladas, se sugiere evitar el desarrollo, siendo esta “la solución a largo plazo más segura y satisfactoria” (Kerr *et al.*, 2003).

Para zonas en desarrollo o con expectativas de desarrollo, se aplica el tercer principio, más permisivo. Este enfoque basado en el riesgo propone permitir algunas actividades aún en zonas de seguridad combinando los tres siguientes elementos. (a) El intervalo de recurrencia de la falla, definido como el tiempo promedio entre rupturas superficiales, cuyo conocimiento requiere de estudios paleosísmicos (generalmente consistentes en la realización de trincheras sobre la falla y dataciones). Se toma como criterio que fallas con intervalos de recurrencia cortos tienen más probabilidades de ruptura superficial en el futuro cercano que fallas con intervalos de recurrencia largos, si bien se aclara que esto es sólo un criterio estadístico y no una predicción precisa de la posibilidad de movimiento en una falla. (b) La complejidad de la falla, que se refiere al ancho de la zona de deformación y la distribución de esta deformación alrededor de la traza superficial de la falla. Según la complejidad, las fallas se clasifican en tres tipos: bien definidas, distribuidas e inciertas. (c) La categoría de importancia de la construcción, que establece cuatro categorías de acuerdo con el tipo de construcción y su utilización. La guía presenta dos tablas (una para zonas en desarrollo y otra para zonas ya desarrolladas) que combinan estos tres elementos indicando qué tipo de construcciones pueden aceptarse sobre zonas de seguridad.

El cuarto principio no es regulador, sino que tiene como objetivo comunicar los riesgos a la comunidad para favorecer que las personas eviten ponerse en riesgo innecesario. Se indica que esto puede complementarse con incentivos para retirar tierras riesgosas o limitar las posibilidades de desarrollo aún en zonas urbanas o suburbanas. Algunos de los métodos sugeridos son la compra de las tierras por parte del municipio y su uso para fines recreacionales, ofrecer permutas de tierras riesgosas por otras tierras que permitan realizar desarrollos, permitir desarrollos mayores a los aceptados regularmente en tierras seguras si las tierras riesgosas son inutilizadas, disminuir los impuestos sobre tierras riesgosas si no son desarrolladas, entre otros.

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

La guía destaca la necesidad de coordinar los esfuerzos para que la normativa no sea diferente en municipios vecinos, ya que las fallas muchas veces involucran tierras bajo la autoridad de más de un municipio. Se sugiere también que se tengan en cuenta las expectativas de los pobladores y el nivel de riesgo que están dispuestos a aceptar.

El caso de Nueva Zelanda es interesante por la falta de legislación hasta el momento, a lo que se asocia el reconocimiento generalizado en la sociedad del peligro sísmico a partir de eventos recientes. Estas condiciones plantean un conflicto entre posibles medidas de prevención y los usos de tierras esperados por diferentes actores sociales. Esto se reflejó en la disputa sobre la posibilidad de instaurar zonas de seguridad contra ruptura superficial en el pueblo de Franz Josef, una pequeña localidad turística visitada por miles de personas cada año. Un estudio encargado por el Consejo Regional de Hawke's Bay y realizado por el Instituto de Ciencias Geológicas y Nucleares de Nueva Zelanda determinó que la falla Alpina, que ha producido terremotos de magnitudes entre 7 y 8 en repetidas oportunidades en el último milenio, cruza el pueblo, pudiendo afectar casas, hoteles y la única estación de servicio (Langridge y Beban, 2011). Basándose en la guía publicada por el Ministerio de Ambiente, y en la detallada caracterización de la falla Alpina realizada, se determinaron las zonas de seguridad correspondientes, que abarcan una buena porción del centro comercial de Franz Josef, y se propusieron distintas alternativas para la implementación de medidas de mitigación. Se recomendó evitar los desarrollos futuros en la zona de seguridad, y consultar a la comunidad acerca de los pasos a seguir con las zonas ya desarrolladas (Langridge y Beban, 2011). Este plan de acción fue aceptado en 2015, sin embargo algunos propietarios de tierras y comercios que podrían verse afectados por restricciones realizaron reclamos legales, y en diciembre de 2016, tras un cambio de autoridades en el Consejo local, se votó por desechar el plan y no establecer zonas de seguridad, a pesar de las recomendaciones del informe y de la nota presentada por otros geólogos en apoyo de la implementación de las zonas de seguridad (The Press, 17/12/2016). El caso de Franz Josef contrasta con el de otras localidades en las que las recomendaciones de la guía fueron implementadas, como el caso del distrito Rotorua Lakes, donde las zonas de seguridad forman parte del plan de distrito vigente (Rotorua District Plan, 2016).

El caso de Mendoza

Conocimiento sobre las fallas activas en el Gran Mendoza y San Rafael

El norte de la provincia de Mendoza es una de las regiones sísmicamente más peligrosas del país. Sin embargo, el conocimiento sobre las fallas activas es

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

incompleto (González *et al.*, 2002), lo que impide un adecuado conocimiento de las características de las fallas. En zonas no urbanizadas, se cuenta con investigaciones que incluyen mapas de las fallas activas que han producido rupturas superficiales (Fig. 1 y Tabla 1; INPRES, 1995; Mingorance, 2006; Moreiras *et al.*, 2014). En zonas urbanas, la traza superficial de las fallas es conocida en forma aproximada, e incluso hay escarpas cuyo origen no pudo ser establecido en los trabajos realizados hasta el momento, como la observada a lo largo de la Avenida Boulogne Sur Mer, que podría corresponder a una falla (INPRES, 1995). La edad de actividad de las fallas es conocida en pocos casos (Tabla 1).

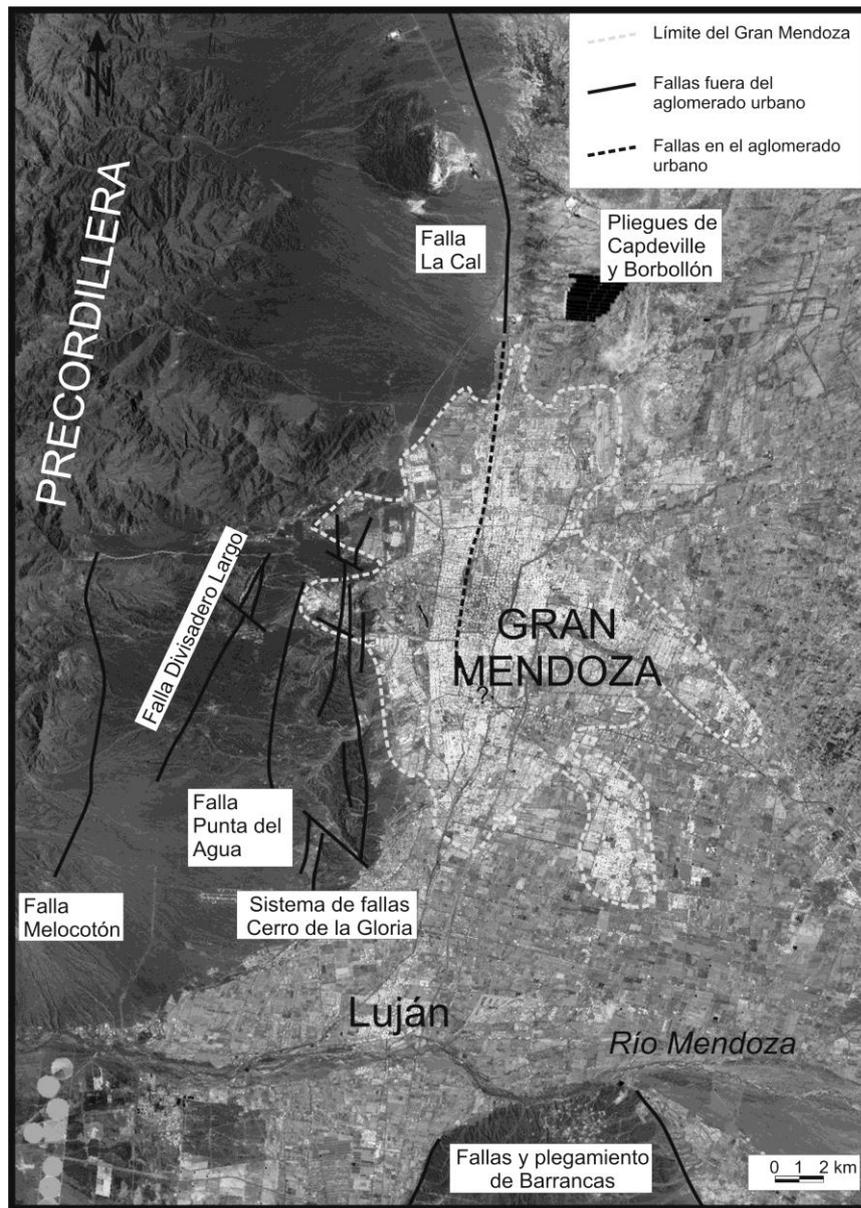
La falla de La Cal, identificada fuera de la ciudad en el departamento de Las Heras (Fig. 1; Bastías *et al.*, 1993; Mingorance, 2006), es conocida en la zona urbana como la falla Calle Perú, ya que se piensa que corre a lo largo de esta calle en el sector norte del Gran Mendoza (departamento de Las Heras), acompañando el recorrido de las vías del tren (INPRES, 1995). Al norte de la ciudad, se ha determinado que la falla La Cal produjo entre 2 y 3 sismos de magnitud $M \sim 6-7$ en los últimos 800 años, con desplazamientos superficiales de entre 0,8 y 2,5 m, el último de los cuales se asocia al terremoto de marzo de 1861 que destruyó la ciudad de Mendoza (Salomon *et al.*, 2013).

En el piedemonte, el sistema de fallas del Cerro de la Gloria (Moreiras *et al.*, 2014) bordea la ciudad por el oeste, y es responsable del cordón de pequeñas sierras que incluye los cerros El Cristo, Cerro de la Gloria y Puntilla, entre otros. Este sistema de fallas se encuentra en zonas urbanizadas en el sector del Cerro de la Gloria y en su extremo sur en Chacras de Coria. Otras fallas no se encuentran por el momento cerca de zonas urbanas, pero deberán ser tenidas en cuenta en caso de que el Gran Mendoza se expanda hacia el oeste.

En el sur de Mendoza, se han reconocido escarpas de falla en los alrededores de la ciudad de San Rafael (Costa *et al.*, 2006). No se cuenta hasta el momento con trabajos que hayan profundizado en el conocimiento de las características y peligrosidad de estas fallas.

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

Figura 1. Mapa de fallas activas en los alrededores del Gran Mendoza.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Conocimiento sobre la actividad de las principales fallas de Mendoza cercanas a centros urbanos.

Falla	Última actividad conocida	Fuente
Falla La Cal	Dos o tres eventos de magnitud ~7 en los últimos 800 años (último evento en 1861?)	Salomon <i>et al.</i> , 2013
Falla Barrancas	Últimos eventos en 1985	INPRES

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

	(M), 2006 (M), 2012 (M)	
Sistema de fallas Cerro de la Gloria	Holocena (Últimos 10.000 años)	Moreiras <i>et al.</i> , 2014
Falla Melocotón	Últimos 38.000 años	INPRES, 1995
Falla Punta del Agua	Cuaternario (últimos 2 Ma)	Moreiras <i>et al.</i> , 2014
Falla Divisadero Largo	Cuaternario (últimos 2 Ma)	Moreiras <i>et al.</i> , 2014
Falla Las Malvinas (San Rafael)	Cuaternario (posible último evento 1929?)	Costa <i>et al.</i> (2006)

Fuente: Elaboración propia

Para poder implementar una normativa contra el peligro de ruptura superficial, sería necesaria la realización de mapas de detalle ubicando las fallas, prestando especial atención a los sectores ya urbanizados. En particular, en el Gran Mendoza, el crecimiento de la ciudad y aumento de la población hace que las fallas presenten un importante riesgo, por ejemplo la falla La Cal que ya se encuentra dentro del trazado urbano. Mientras que otras ciudades como San Rafael pueden encontrarse en la misma situación si su crecimiento no se ordena teniendo en cuenta las fallas activas.

Hacia una propuesta de normativa contra el peligro por ruptura superficial en Mendoza

Del análisis de la información disponible sobre las fallas activas en el norte de Mendoza surge la necesidad de tener en cuenta el peligro de ruptura superficial a la hora de determinar los usos de tierra. Para esto, es necesario en primer lugar diferenciar las zonas ya urbanizadas o de inminente urbanización de aquellas rurales o de interfase urbano-rural, para aplicar criterios diferenciados de manera similar a lo propuesto para Nueva Zelanda.

En segundo lugar, es necesaria la confección de mapas oficiales de fallas activas a escala adecuada (se propone 1:10.000 para zonas urbanas, y 1:25.000 para zonas rurales). Estos mapas deben ser confeccionados por especialistas (geólogos) en función de la información disponible y de relevamientos de campo, y deberán actualizarse a medida que exista nueva información. Se propone clasificar a las fallas en tres categorías en función de la certeza con que pueden ser identificadas: bien definidas, distribuidas e inferidas. Asimismo, puede utilizarse una clasificación jerárquica: fallas principales para aquellas que tengan desplazamientos acumulados de más de 0,5 m y fallas menores aquellas que tengan desplazamientos >0,5 m. Por último, de contarse con datos sobre la edad de los desplazamientos producidos sobre la falla, pueden diferenciarse fallas con desplazamiento histórico, Holoceno y

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

Cuaternario. En el caso de que la falla no pueda ubicarse con precisión en los mapas, como por ejemplo en zonas donde la topografía esté alterada por la urbanización, se puede ubicar aproximadamente la falla en la cartografía oficial, y requerir que cualquier proyecto a desarrollar en las cercanías realice un estudio geológico para determinar si se encuentra sobre la falla o no.

Si bien los encargados de determinar usos de tierra y otorgar permisos para construcciones son los municipios, la tarea de confeccionar los mapas de fallas debería ser realizada a nivel provincial para asegurar uniformidad de metodologías y criterios. Puede planearse un esquema en el que se realicen primero los mapas de zonas urbanas y zonas con mayor presión de desarrollo, dando menor prioridad a zonas rurales o de montaña, de manera similar a lo realizado en California.

Para poder aplicar los mapas al ordenamiento territorial, deben establecerse los criterios con los que se determinará el ancho de la zona de seguridad. Como se señaló en las evaluaciones realizadas para la normativa de California, éste no es un tema fácil de resolver. Si bien lo ideal sería determinar la zona de seguridad en cada caso teniendo en cuenta las condiciones del sitio, esto puede dar lugar a valoraciones subjetivas y generar problemas legales. La experiencia californiana sugiere que utilizar criterios claramente especificados es menos problemático, aún más si se tiene en cuenta el conocimiento incompleto sobre las fallas activas en Mendoza. Para fallas principales, bien definidas, un ancho de 15 metros a cada lado de la falla podría ser suficiente para evitar el peligro de ruptura superficial. Para fallas que no pueden ser ubicadas con precisión (distribuidas e inferidas), este valor debería abarcar toda la zona de deformación más una franja de 15 m a cada lado. Por otro lado, en fallas de desplazamiento predominante de inclinación como las que se encuentran más frecuentemente en Mendoza puede ser necesario utilizar zonas de seguridad asimétricas para tener en cuenta la mayor deformación que suele producirse en el bloque colgante en este tipo de fallas. Esto no se detalla explícitamente en las normativas analizadas, pero queda especificado a partir de la posibilidad de determinar zonas de seguridad variables a cada lado de la falla a partir de los estudios geológicos (Kerr *et al.*, 2003). Diferentes investigadores han señalado la importancia del efecto de bloque colgante, tanto en California como en Nueva Zelanda (por ej. Bray, 2009; Treiman, 2010; Langridge y Beban, 2011).

Una vez realizados los mapas, los usos permitidos de tierra pueden establecerse sobre la base de la combinación del tipo de territorio (urbano, rural o de interfase) y de las características de la falla (principal o menor, definida, bien distribuida o inferida).

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

De acuerdo con la experiencia californiana, la única medida posible para fallas importantes (desplazamientos superficiales máximos esperados de más de 50 cm) es evitar las construcciones. En zonas aún no construidas, esto puede aplicarse. La posibilidad de permitir medidas de mitigación geotécnicas y estructurales (Bray, 2009; Oettle y Bray, 2013) para fallas menores debe ser estudiada por ingenieros especializados en construcción sismorresistente. De esta manera, en zonas rurales o de interfase podrían establecerse zonas de seguridad de al menos 15 m alrededor de las fallas, en las que no se permiten estructuras de ocupación humana. En estos ambientes, dada la disponibilidad de espacio, no debería ser difícil desplazar las construcciones propuestas si se encuentran sobre la zona de seguridad. En zonas de interfase urbano-rural, especialmente donde la expansión urbana es prevista en el futuro cercano, sería prioritario establecer zonas de seguridad y limitar los usos posibles de tierras sobre las fallas activas. Las zonas de seguridad pueden tener usos en los que la ocupación no sea permanente, como parques recreativos, estacionamientos, depósitos, etc. De esta manera, la zona será más resiliente frente al peligro de ruptura superficial desde el inicio de la urbanización.

Para zonas urbanas, el criterio a utilizar debería ser no agravar la situación. Debido a la incertidumbre en la ubicación de las fallas en ambiente urbano, las zonas de seguridad probablemente abarquen áreas más grandes en estas regiones. Cualquier proyecto situado en las zonas de seguridad definidas en los mapas deberá presentar un estudio geológico en el que se evalúe el peligro por ruptura superficial. De esta manera, el conocimiento sobre las fallas aumentará a medida que se propongan nuevos proyectos de desarrollo. A medida que se cuente con más información, y puedan ubicarse las fallas con más precisión, se pueden actualizar los mapas y determinar zonas de seguridad de menor área. Si bien no es realista proponer zonas de no construcción en ambientes urbanos como la ciudad de Mendoza, sí pueden establecerse limitaciones a los tipos de edificación permitidos. Por ejemplo, no es lo mismo que sea afectada por ruptura superficial una vivienda unifamiliar que una torre de gran altura en la que viven cientos de personas. Lo más sensato sería no permitir edificaciones con coeficientes de ocupación mayores, que lleven a un riesgo mayor. Esto puede complementarse con medidas que desincentiven las ampliaciones de las edificaciones existentes y busquen reemplazar los usos de ocupación permanente por otros como parques, estacionamientos, etc. de manera similar a lo propuesto en Nueva Zelanda. Por otro lado, el desarrollo de mapas precisos de fallas activas puede requerir una revisión de la ubicación de edificios estratégicos para la respuesta frente a desastres naturales (cuarteles de bomberos, hospitales, escuelas que puedan servir

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

como refugios temporales, etc.). En caso de ubicarse sobre la traza de fallas activas, deberá planearse la respuesta a desastres naturales incluyendo el peligro de ruptura superficial, estableciéndose alternativas en caso de quedar inutilizados los edificios mencionados. A largo plazo, puede planearse su reubicación.

Conclusiones

La ubicación de la provincia de Mendoza en una región sísmicamente activa, con evidencias de ruptura superficial de fallas afectando depósitos cuaternarios, e incluso rupturas históricas (1861), hace que el peligro por ruptura superficial sea elevado. Esto configura un riesgo para la infraestructura de las ciudades y para las vidas de sus habitantes. Este riesgo puede ser disminuido mediante regulaciones que determinen los usos de tierras permitidos en la cercanía de las fallas activas, de manera similar a lo realizado o proyectado en otras regiones del mundo (California, EEUU; Costa Rica; Nueva Zelanda; entre otros). Los pasos a realizar para generar una normativa son: (1) la confección de mapas oficiales de fallas activas; (2) el establecimiento de zonas de seguridad alrededor de estas fallas; (3) la determinación de los usos de tierras permitidos en función de las características de la falla, el tipo de edificación propuesto y la clasificación del territorio (urbano/interfase/rural). Generar una regulación, teniendo en cuenta la experiencia internacional, permitirá un desarrollo territorial más ordenado que fortalecerá la resiliencia de Mendoza frente al peligro sísmico.

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

Bibliografía

ASTORGA, A. (2013). La definición de usos del suelo en las cercanías de fallas geológicas: explicación del Protocolo Técnico del Decreto Ejecutivo 32967-MINAE, Anexo 3, en Revista Geológica de América Central, 49, pp.149-153.

ASTORGA, A. (2016). Los problemas de efectividad en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental de Costa Rica y sus consecuencias para la gestión del geólogo, en Revista Geológica de América Central, 55, pp.197-205.

BASTÍAS, H., TELLO, G.E., PERUCCA, J.L. y PAREDES, J.D. (1993). Peligro sísmico y neotectónica, en Ramos, V.A. (editor), Geología y Recursos Naturales de Mendoza, Relatorio del 12 Congreso Geológico Argentino y 2 Congreso de Exploración de Hidrocarburos, pp. 645-658. Mendoza, Asociación Geológica Argentina.

BORCHARDT, G. (2010). Establishing appropriate setback widths for active faults, en Engineering and Environmental Geoscience, 16(1), 47-53.

BRAY, J.D. (2009). Designing Buildings to Accommodate Earthquake Surface Fault Rupture”, en Goodno, B. (editor), ATC & SEI Conference on Improving Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, páginas 1269-1280, Reston, American Society of Civil Engineers.

BRYANT, W.A. (2010). History of the Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act, California, USA, en Environmental & Engineering Geoscience, 16(1), 7-18.

CATO, N. (2010). Foreword, en Environmental and Engineering Geoscience, 16(1), 1-2.

COSTA, C., CISNEROS, H., SALVARREDI, J., y GALLUCI, A. (2006). La neotectónica del margen oriental del bloque de San Rafael: nuevas consideraciones, en Actas de la 12 Reunión de Tectónica, pp. 33-40, Buenos Aires, Asociación Geológica Argentina.

GONZÁLEZ, M.A., GONZÁLEZ DÍAZ, E.F., SEPÚLVEDA, E., REGAIRAZ, M.C., COSTA, C., CISNEROS, H., BEA, S., GARDINI, C., PÉREZ, I. y PÉREZ, M. (2002). Carta de peligrosidad geológica 3369-II, Mendoza. Provincias de Mendoza y San Juan, Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 324, 178 p.

Joint Panel on the San Fernando Earthquake (1971). The San Fernando earthquake of February 9, 1971. Lessons from a moderate earthquake on the fringe of a densely populated region, 31 p., Washington D.C., National Academy of Sciences.

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

INPRES (1995). Microzonificación sísmica del Gran Mendoza. Resumen Ejecutivo, 269 p., San Juan, Instituto Nacional de Prevención Sísmica.

_____ (2005a). Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes INPRES-CIRSOC 103, Parte II – Construcciones de Hormigón Armado, 110 p., San Juan, Instituto Nacional de Prevención Sísmica.

_____ (2005b). Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes INPRES-CIRSOC 103, Comentarios a la Parte II – Construcciones de Hormigón Armado, 79 p., San Juan, Instituto Nacional de Prevención Sísmica.

_____ (2005c). Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes INPRES-CIRSOC 103, Parte IV – Construcciones de Acero, 82 p., San Juan, Instituto Nacional de Prevención Sísmica.

_____ (2005d). Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes INPRES-CIRSOC 103, Comentarios a la Parte IV – Construcciones de Acero, 84 p., San Juan, Instituto Nacional de Prevención Sísmica.

_____ (2013a). Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes INPRES-CIRSOC 103, Parte I – Construcciones en General, 105 p., San Juan, Instituto Nacional de Prevención Sísmica.

_____ (2013b). Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes INPRES-CIRSOC 103, Comentarios a la Parte I – Construcciones en General, 85 p., San Juan, Instituto Nacional de Prevención Sísmica.

KERR, J., NATHAN, S., VAN DISSEN, R., WEBB, P., BRUNSDON, D. y KING, A. (2003). Planning for development of land on or close to active faults, an interim guideline to assist resource management planners in New Zealand. 56 p., Wellington, Ministry for the Environment.

LANGRIDGE, R.M. y BEBAN, J.G. (2011). Planning for a safer Franz Josef-Waiiau community, Westland District: considering rupture of the Alpine Fault, 61 p., Wellington, GNS Science Consultancy Report 2011/217.

MINAE (2006). Manual de Instrumentos Técnicos para el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (Manual de EIA), Parte III. Decreto 32967. Procedimiento para introducir la variable ambiental en los planes reguladores y planificación de uso del suelo, en La Gaceta, n.85, 239-307.

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

MIGNORANCE, F. (2006). Morfometría de la falla histórica de la zona de falla La Cal, en Revista de la Asociación Geológica Argentina, 61(4), 620-638.

MOREIRAS, S.M., GIAMBIAGI, L.B., SPAGNOTTO, S., NACIF, S., MESCUA, J.F. y TOURAL DAPOZA, R. (2014). El frente orogénico activo de los Andes a la latitud de la ciudad de Mendoza (32°50-33°S), en *Andean Geology*, 41(2), 342-361.

OETTLE, N.K. y Bray, J.D. (2013). Geotechnical Mitigation Strategies for Earthquake Surface Fault Rupture, en *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139, 1864-1874 .

ROTORUA DISTRICT PLAN (2016), 730 p., Rotorua Lakes Council

REITERMAN, R y Leeds, D.J. (1991), "A study of the effectiveness of the Alquist-Priolo Program", 131 p., Sacramento, Division of Mines and Geology, Open File Report OFR 90-18.

SALOMON, E., SCHMIDT, S., HETZEL, R., MINGORANCE, F. y HAMPEL, A. (2013). Repeated folding during late Holocene earthquakes on the La Cal thrust fault near Mendoza City (Argentina), en *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 936-949.

SCHLEMMON, R.J. (2010). A proposed mid-Holocene age definition for hazardous faults in California, en *Engineering and Environmental Geoscience*, 16(1), 55-64.

SEXTON, C.J. (2008). Implementing the California earthquake fault zoning act: A proposal for change, en *Engineering and Environmental Geoscience*, 14(1), 43-51.

SEXTON, C.J. y BLAKE, T.F. (2010). Challenges in peer review of fault-rupture hazard studies for engineering mitigation, en *Engineering and Environmental Geoscience*, 16(1), 41-46.

SHARP, R.V. (1975). Displacement on tectonic ruptures, en Oakeshott, G.B. (editor), San Fernando, California earthquake of 9 February 1971, pp. 187-194, Sacramento, Bulletin 196 of the California Division of Mines and Geology.

SMGB (2015). Executive Officer's Report. Agenda Item No. 8: Summary and Status of the Geohazards Committee Technical Advisory Committee Efforts in Review of the Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act. State Mining and Geology Board, 6 p. Disponible en: <ftp://ftp.consrv.ca.gov/pub/smgb/2015/April-2015/08%20RBM%200409->

Mescua, J.; Giambiagi, L. / Peligro sísmico por ruptura superficial: revisión de legislaciones en diferentes regiones sísmicas del mundo y propuesta para Mendoza.

[8%20GHC%20TAC%20Summary/RBM%200409-](#)

[8%20GHC%20TAC%20Summary.pdf](#) (recuperado el 25/6/2017).

SOMERVILLE, P.G., SMITH, N., GRAVES, R. y ABRAHAMSON, N. (1997). Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity”, en *Seismological Research Letters*, 68(1), 199-222.

TREIMAN, J.A. (2010). Fault rupture and surface deformation: defining the hazard, en *Engineering and Environmental Geoscience*, 16(1), 19-30.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (1971). The San Fernando, California, earthquake of February 9, 1971: a preliminary report published jointly by the U.S. Geological Survey and the National Oceanic and Atmospheric Administration, 279 p., Washington D.C., Geological Survey Professional Paper 733.

WELLS, D.L. y COPPERSMITH, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement, en *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.