


Especial

El terremoto de Chile de 2010: la ciencia y el seguro también evolucionan



A vertical photograph on the left side of the page shows a close-up of sand and water, likely from a beach. The sand is light-colored and textured, with some small dark spots. The water is dark and blurry, creating a soft background for the text.

El terremoto de magnitud 8,8 de Maule (Chile)

Evaluación sismológica y observaciones del estudio de campo

John E. Alarcon
MEng (Civil Eng), MSc, PhD DIC
Investigador asociado
AIR Worldwide (Londres, Reino Unido)

Guillermo Franco
Civil Eng, MSc, PhD
Ingeniero principal
AIR Worldwide (Boston, EE.UU.)

En 2010, un número de terremotos de gran magnitud sacudieron zonas pobladas, causando una amplia destrucción, elevadas cifras de víctimas, importantes daños económicos y cuantiosas pérdidas aseguradas. De entre estos eventos sísmicos, el terremoto de Maule (Chile), del 27 de febrero, ocasionó los mayores daños en cuanto a pérdidas económicas. El presente artículo aborda algunos de los aspectos sismológicos relativos a este terremoto, describe las dificultades que supone modelizar el evento a efectos de estimación de daños y pérdidas, y ofrece algunos resultados de las observaciones de campo obtenidos poco después del seísmo. El artículo expone brevemente cómo este evento puede haber modificado la configuración sísmica y el potencial de futuros terremotos en la región de Chile.



Valparaíso, Chile

Lo realmente importante para la estimación de daños es la proximidad al plano de ruptura, más que al epicentro del terremoto

Introducción

En 2010 se ha registrado, hasta la fecha, un importante número de terremotos que han afectado núcleos urbanos. El primero de ellos se produjo el 10 de enero, cuando un terremoto de magnitud de momento sísmico (Mw) de 6,5 sacudió el norte de California. Aunque el seísmo ocurrió en alta mar y no causó daños significativos, para los californianos y la comunidad aseguradora constituyó un recordatorio de la elevada sismicidad de la región. Dos días después, el 12 de enero, Haití sufrió un terremoto superficial (localizado a escasa profundidad) próximo a su capital, Port-au-Prince. El evento, con una Mw de 7,0, produjo grandes daños en la ciudad y una cifra de alrededor de 222.000 víctimas mortales. Más de un millón de personas quedaron sin hogar (USGS, 2010). Un mes y medio más tarde, el 27 de febrero, un potente seísmo de 8,8 Mw sacudió una extensa franja de Chile central y especialmente las regiones de Biobío, Maule y Araucanía. El terremoto causó daños en la ciudad de Concepción, la segunda mayor zona urbana del país. Todavía están en curso las reclamaciones por siniestro, pero se prevé que el total de pérdidas aseguradas sea elevado.

Otros terremotos de importancia ocurridos este mismo año fueron el del 4 de marzo en Taiwán, con una magnitud Mw de 6,3, que si bien no provocó una gran destrucción, le recordó a la población el devastador seísmo de Chi-Chi, en 1999; el del 8 de marzo en Karakocan (Turquía), de 6,1 Mw; el del 4 de abril en Baja California, de 7,2 Mw, que ocasionó considerables daños

en Mexicali, la capital del Estado de Baja California (México), y más recientemente, el terremoto del 4 de septiembre en Christchurch (Nueva Zelanda), de 7,0 Mw, en el que se esperan grandes pérdidas que serán en parte abonadas por la EQC (la comisión de terremotos neozelandesa que proporciona cobertura de seguro frente a los desastres naturales que afectan a bienes residenciales).

El inusual número de seísmos que afectan a núcleos urbanos no es el resultado de un incremento de la sismicidad mundial durante 2010, sino más bien la consecuencia de la expansión de los centros urbanos y, por tanto, de la mayor exposición de las zonas urbanizadas a los peligros naturales. Considerando la importancia del terremoto de Maule (Chile) para el mercado (re)asegurador, el presente artículo examina algunos de sus detalles sismológicos y los daños observados durante una investigación de campo, y describe brevemente cómo este evento puede haber influido en el riesgo sísmico de la región con respecto a futuros terremotos.

Descripción del evento sísmico

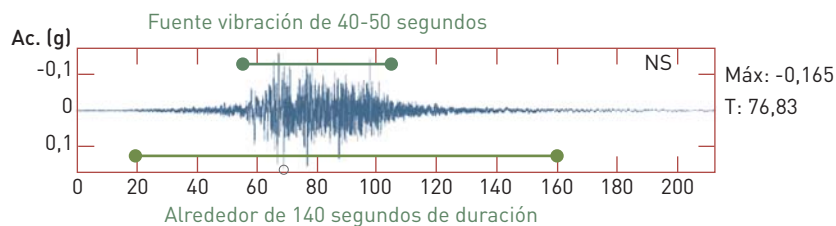
A las 3:34 de la mañana, hora local (6:34 a.m. UTC), un terremoto de magnitud de momento sísmico (Mw) de 8,8, registrado frente a la costa central de Chile, sacudió las regiones de Valparaíso, Región Metropolitana de Santiago, O'Higgins, Maule, Biobío y Araucanía, causando extensos daños en Chile central. El área afectada

¹ USGS -United States Geological Survey- Servicio de Investigaciones Geológicas de los EE.UU.



Figura 1. Registro del movimiento fuerte del terreno durante el terremoto de Maule (Chile)

La duración total del temblor de tierra fue de alrededor de 140 segundos y la parte más intensa del mismo duró entre 40 y 50 segundos. Fuente: RENADIC (Red Nacional de Acelerógrafos de Ingeniería Civil de la universidad de Chile)



por el seísmo abarcó aproximadamente 600 km a lo largo de la costa y alcanzó los 100 km hacia el interior. La energía sísmica liberada durante este evento equivale a alrededor de 22 veces la energía liberada en el terremoto de 2007 en Pisco (Perú), que fue de 7,9 Mw; unas 500 veces la energía del terremoto de 2010 en Haití, cuya magnitud fue de 7,0 Mw, y a unas 7.940 veces la energía liberada durante el terremoto de 2009 en L'Aquila (Italia), que fue de 6,2 Mw.

Los daños causados por los movimientos del terreno se agravaron en las zonas costeras debido al maremoto (tsunami) subsiguiente, que produjo olas de hasta 11 metros de altura. En Chile, donde se han medido las mayores olas de maremotos, la altura media de ola entre 23 medidas fue de 3,7 metros, aproximadamente ²(NGDC, 2010). Aunque el epicentro del seísmo (es decir, la proyección puntual sobre la superficie de la Tierra del punto donde comienza un terremoto) se localizó inicialmente a 107 km de la ciudad de Concepción y a 328 km de Santiago de Chile, las distancias de estas ciudades al plano de ruptura de la falla del terremoto eran mucho menores.

El temblor de tierra inducido por el terremoto fue de muy larga duración (alrededor de 140 segundos), y la parte más intensa del mismo duró entre 40 y 50 segundos (véase la figura 1). Las aceleraciones horizontales inducidas en Concepción alcanzaron hasta los 6,4 m/sg², o sea, aproximadamente el 65% de la gravedad terrestre. Ello significa que algunos edificios de Concepción pueden haber recibido, durante una

fracción de segundo, fuerzas laterales equivalentes al 65% de su peso vertical.

La duración e intensidad del temblor de tierra causó daños a estructuras que comprendían desde antiguas casas de adobe hasta modernos edificios de hormigón armado. El ministro chileno de la vivienda consideró inicialmente que habían sido dañadas en algún grado un millón y medio de casas, pero según una información más reciente del gobierno de Chile, se estima que su número es del orden de 370.000. En la mayoría de los casos, los daños a edificios construidos conforme a las normas de sismorresistencia se limitaron principalmente a elementos no estructurales, lo que pone de relieve el historial chileno de buenos códigos de diseño sísmico y prácticas de construcción. No obstante, hay que señalar que un reducido número de edificios así construidos sufrieron colapsos severos o parciales. El terremoto también afectó gravemente a diversas infraestructuras, como carreteras, puentes, aeropuertos, servicios de abastecimiento y redes de telecomunicaciones.

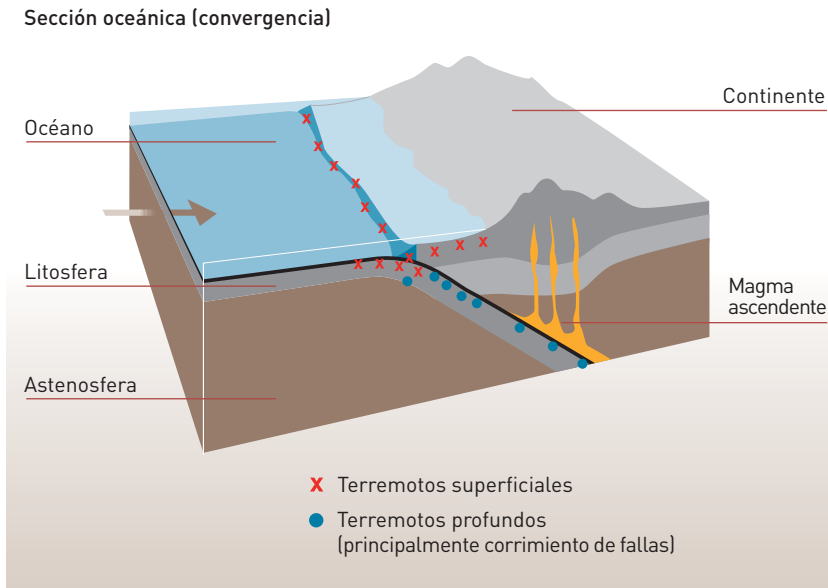
El marco tectónico

Chile está situado en el denominado "Cinturón de fuego del Pacífico", que en esencia representa el límite entre las placas tectónicas oceánicas y continentales que rodean el Océano Pacífico. En términos generales, las placas oceánicas,

² NGDC: National Geophysical Data Center de EE.UU. Centro Nacional de Datos Geofísicos.

Figura 2. Proceso general de la subducción

La placa oceánica (placa del lado izquierdo) es empujada bajo la placa continental más gruesa (lado derecho). La colisión de ambas deforma la placa continental, un proceso que a menudo crea cordilleras. Fuente: Bolt (2003)



Falla geológica en estratos de ceniza volcánica en un corte de carretera

Figura 3. Los mayores terremotos registrados se han producido en el Anillo de fuego del Pacífico

La figura indica los 10 mayores seísmos registrados, junto con el año en que ocurrieron y su magnitud. El terremoto de Maule ocupa el quinto lugar. Fuente: AIR



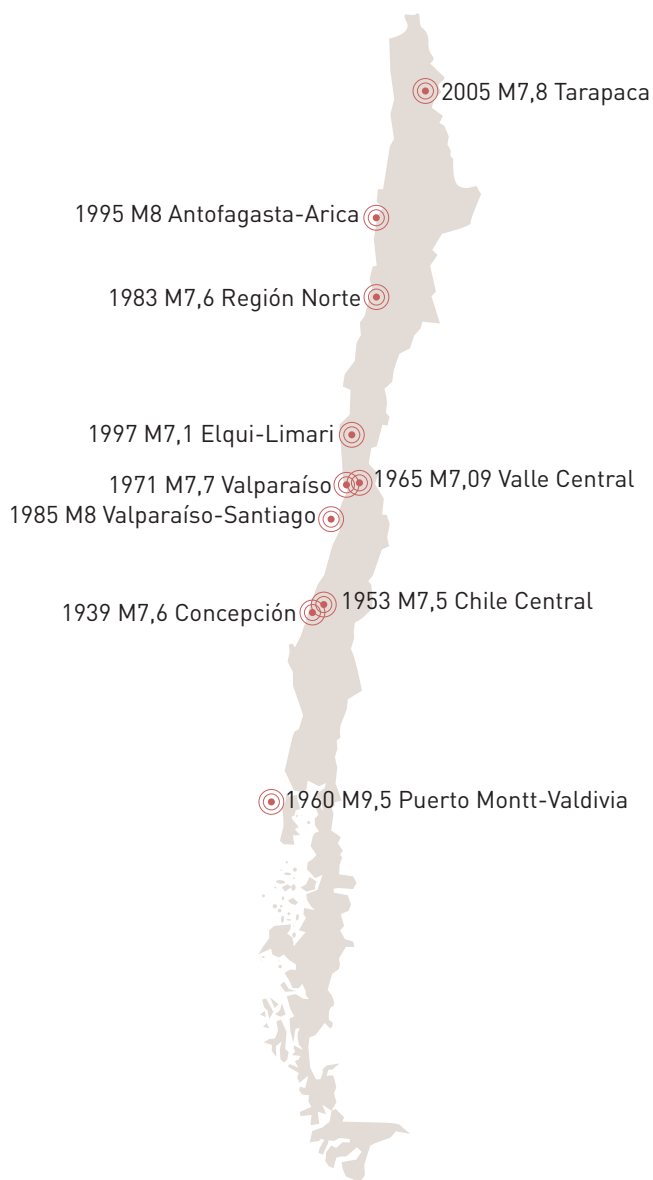
- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 Chile, 1960: Mw 9,5 | 6 Ecuador, 1906: Mw 8,8 |
| 2 Alaska, 1964: Mw 9,2 | 7 Islas Rat, 1965: Mw 8,7 |
| 3 Sumatra, 2004: Mw 9,1-9,3 | 8 Sumatra, 2005: Mw 8,6 |
| 4 Kamchatka, 1952: Mw 9,0 | 9 Islas Andreanof, 1957: Mw 8,6 |
| 5 Chile, 2010: Mw 8,8 | 10 Tíbet, 1980: Mw 8,6 |

más delgadas y densas, son subducidas bajo las continentales, más gruesas, pero más ligeras (véase la figura 2).

El Cinturón de fuego del Pacífico (en inglés: Pacific Ring of Fire, ROF) se extiende 40.000 km, desde Chile, en Suramérica, hasta Nueva Zelanda, en el Pacífico occidental (véase la figura 3). La colisión de estas enormes placas tectónicas hace que se acumulen ingentes cantidades de energía que luego se liberan de repente en lo que se conoce como un terremoto. La mayor parte de esta energía se convierte en calor y en una deformación permanente del terreno, como ocurre en la formación de las montañas. Sólo alrededor del 5% del total de la energía liberada se transforma en temblores de tierra. Los mayores terremotos registrados mediante sismógrafos han ocurrido en el Cinturón de fuego del Pacífico (ROF), y se estima que alrededor del 75% de la energía sísmica total producida en el mundo al año es liberada a lo largo del ROF. La figura 3 indica asimismo los diez mayores seísmos registrados con instrumentos en el mundo, casi todos ellos en el ROF. El mayor terremoto registrado tuvo lugar en 1960 en



Figura 4. Localización de los diez mayores terremotos históricos de Chile en términos de pérdidas estimadas si se repitiesen en la actualidad
(Fuente: AIR, 2009)



Chile, con una magnitud de 9,5 Mw, mientras que el terremoto de Maule, de 2010, ocupa por su intensidad el quinto lugar en la lista.

Las placas tectónicas implicadas en la colisión del Cinturón de fuego en Chile son la placa oceánica de Nazca y la placa continental suramericana. La placa de Nazca está siendo subducida bajo la placa suramericana a una velocidad de alrededor de 80 mm al año. La placa oceánica antártica también es subducida bajo la placa suramericana en el extremo más meridional de Chile, pero lo hace a una velocidad de 20 mm al año, por lo que la actividad sísmica en esta región es mucho menor que a lo largo del límite entre la placa suramericana y la de Nazca.

Desde 1973, Chile ha sufrido trece terremotos con magnitudes iguales o superiores a 7,0, y Concepción, en particular, fue gravemente afectada en 1939, durante el terremoto de 7,6 Mw. La figura 4 ilustra la localización y las magnitudes de los diez mayores eventos sísmicos históricos de Chile, anteriores al terremoto de Maule, en términos de pérdidas estimadas si se repitiesen en la actualidad (AIR, 2009).

Las dificultades de modelizar el evento sísmico de Maule

Estimar los daños causados por un terremoto en tiempo real implica evaluar los parámetros sismológicos relevantes (es decir, la magnitud, el tipo y la localización del evento y la geometría de ruptura de la falla como parámetros primarios), estudiar cómo se transmite a través de la tierra la energía sísmica liberada, la respuesta particular en cada lugar concreto de acuerdo con el tipo de suelo, la edad del edificio o de la infraestructura objeto de evaluación y la

En los países propensos a sufrir terremotos, se han aprobado códigos de diseño sismorresistente, que se han ido actualizando de acuerdo con las lecciones aprendidas de anteriores eventos



Volcán Osorno, Chile

calidad del diseño y de la construcción de las estructuras afectadas, entre otras variables. El presente apartado se centra en las dificultades relativas a la evaluación de los parámetros sísmológicos poco después del terremoto.

La tabla 1 presenta las coordenadas del epicentro en términos de latitud y longitud, la profundidad del evento sísmico (profundidad focal) y la magnitud asignada por cuatro respetadas agencias sísmológicas diferentes,

de Chile, Alemania, EE.UU. y Europa. Los datos indicados se emitieron poco después de ocurrir el seísmo y se publicaron en Internet el 2 de marzo, a los tres días del principal temblor.

La primera diferencia que llama la atención procede de las magnitudes inicialmente asignadas, ya que la UCSC (Chile) y el GFZ (Alemania) dieron estimaciones iniciales de 8,3 Mw, frente a los 8,8 Mw que indicaron el USGS (EE.UU.) y el EMSC (Europa). Esto representa una diferencia de 5,6 veces la intensidad del terremoto en términos de la energía liberada. Aunque más tarde las magnitudes de 8,3 se revisaron al alza hasta 8,8, ello pone de relieve la importancia de estas diferencias iniciales en la estimación de daños y pérdidas en las primeras 24 ó 48 horas del seísmo.

La segunda divergencia se deriva de la estimación de la ubicación del epicentro, para el que pueden calcularse diferencias de hasta aproximadamente 50 km, según se desprende de la tabla 1. Si bien la estimación de la intensidad del movimiento del suelo inducido a una cierta distancia de una fuente sísmica es muy compleja e incluye la evaluación de las condiciones del suelo, los efectos topográficos y la directividad de la ruptura, entre otros

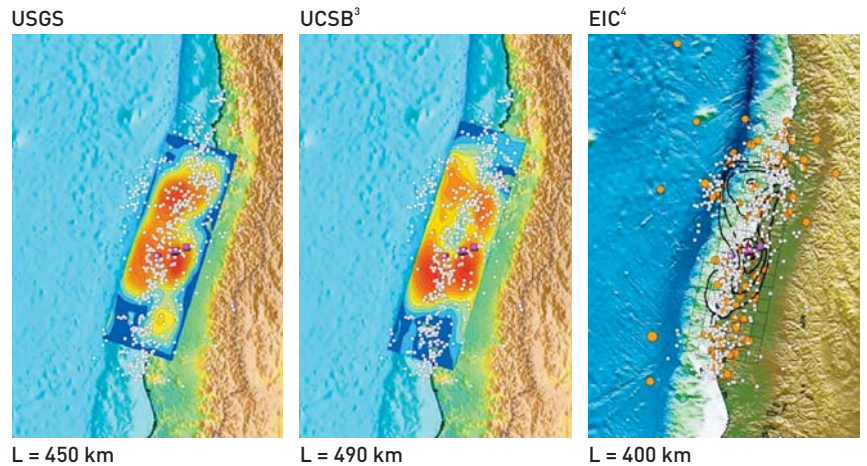
Tabla 1. Parámetros sísmicos del terremoto de Maule, según se publicaron el 2 de marzo a las 10:00 horas de la mañana GMT. Las cifras en rojo indican los datos que se corregirían posteriormente

Agencia	Ubicación del epicentro		Profundidad focal (km)	Magnitud Mw
	Latitud (S)	Longitud (W)		
UCSC (Chile)	36,208	72,963	47,4	8,3
EMSC (Europa)	35,89	73,04	30	8,8
GFZ (Alemania)	36,04	72,66	30	8,3
USGS (EE.UU.)	35,846	72,719	35	8,8

Notas: UCSC –Universidad Católica de la Santísima Concepción; EMSC – Centro Sísmológico Europeo-Mediterráneo; GFZ – Centro Alemán de Investigación de Ciencias de la Tierra; USGS –Servicio de Investigaciones Geológicas de los EE.UU. (United States Geological Survey)



Figura 5. Planos de ruptura de falla estimados por tres agencias sismológicas: USGS (izquierda), UCSB (centro) y EIC (derecha). Los rectángulos de cada figura representan la proyección sobre la superficie de la Tierra del plano de ruptura sísmica de la falla. El color rojo representa zonas de mayores deslizamientos (es decir, mayores liberaciones de energía) y el azul representa zonas de ruptura con menores deslizamientos. Las líneas negras gruesas del gráfico del EIC unen zonas con un deslizamiento similar (Fuente: AIR)



³ University of California, Santa Bárbara

⁴ Centro de Información Sísmica de Japón

factores, una diferencia de 50 km puede tener consecuencias muy diversas. Siendo iguales todos los factores, como las condiciones del suelo, en general, el que el epicentro de un terremoto de magnitud moderada (por ejemplo, en torno a 6,5 Mw) esté 50 km más cerca o más lejos puede representar, para una estructura concreta, una diferencia entre el total desplome y unos daños sólo leves o la ausencia de daños. Aunque este ejemplo supone una generalización, y la correlación entre daños y distancia del epicentro no es tan directa, las discrepancias en la estimación de la ubicación del epicentro poco después del seísmo ilustran las incertidumbres existentes en la determinación de los parámetros sísmicos.

El tercer parámetro de la tabla 1 es la profundidad focal, que desde el punto de vista sismológico es el factor más difícil de determinar con cierto nivel de precisión, razón por la cual suelen encontrarse diferencias en torno a los 10 km en los datos publicados por diversas agencias sismológicas.

El último aspecto relativo a los parámetros del seísmo de Maule es la definición de la geometría real de ruptura de la falla que, junto con la magnitud, es el parámetro más importante para

caracterizar un terremoto. Asimismo, es uno de los más difíciles de cuantificar. Un terremoto no consiste en un único punto dentro de la Tierra (el hipocentro) que libera energía, sino que, en realidad, es todo un plano o zona de contacto entre dos placas tectónicas (o dos lados de una falla activa) que se mueven repentinamente una con respecto a la otra en un desplazamiento muy rápido. En un entorno de subducción, este repentino deslizamiento entre placas libera la energía acumulada por la colisión de las placas tectónicas. Hay que señalar que esta acumulación de energía se produce a lo largo de décadas, siglos o incluso milenios antes de que se desencadene un terremoto.

El tamaño del plano de ruptura varía proporcionalmente a la magnitud del terremoto. Por ejemplo, en el terremoto de 7,0 Mw de Christchurch (Nueva Zelanda), de septiembre de 2010, el plano de ruptura tenía alrededor de 35 km de largo, mientras que el del terremoto de Maule, de 8,8 Mw, tuvo una longitud de unos 450 km. La longitud estimada del plano de ruptura del terremoto de Chile de 1960, de 9,5 Mw, fue de aproximadamente 1.000 km.

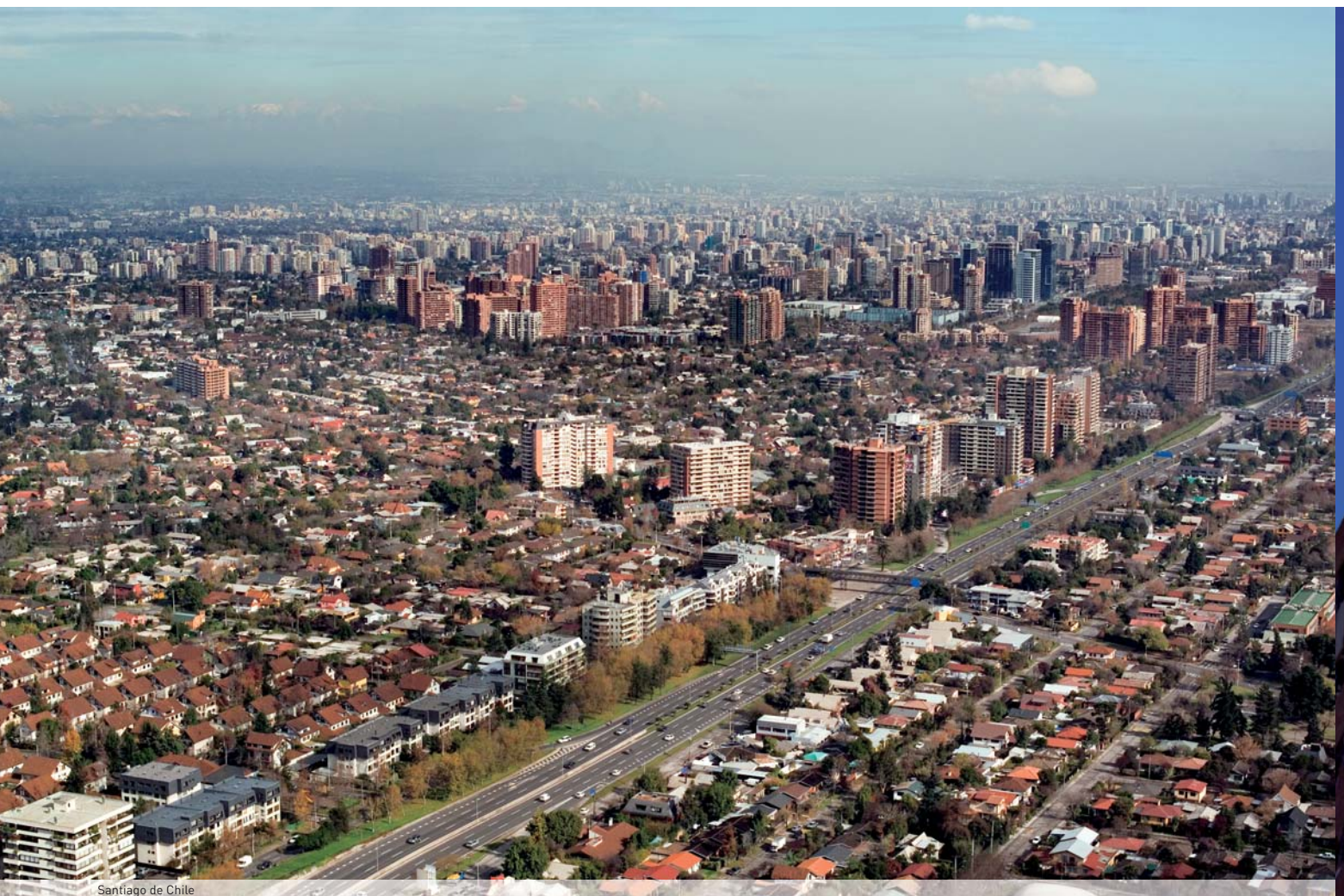
La figura 5 muestra el plano de ruptura estimado del terremoto de Maule según el

Servicio de Investigaciones Geológicas de los EE.UU (USGS), la Universidad de California (UCSB) y el Centro de Información Sísmica de Japón (EIC). Los rectángulos de cada figura representan la proyección sobre la superficie de la Tierra del plano de ruptura del seísmo, mientras que los colores indican el grado del deslizamiento de ruptura (cuanto mayor es el deslizamiento, mayor es la cantidad de energía sísmica liberada en esa parte de la ruptura de la falla). La figura del EIC, en lugar de una escala de colores, presenta unas líneas que unen los puntos que tienen un deslizamiento similar. Estas líneas son semejantes a las líneas isosísmicas de daños o a las isobaras de un mapa meteorológico.

Las longitudes de ruptura estimadas por el USGS, la UCSB y el EIC son de 450, 490 y 400 km, respectivamente. Además, se observa que la ubicación del plano de ruptura de la UCSB se extiende más hacia el nordeste que

en el gráfico del USGS, lo que sitúa el plano de la falla más cerca de la capital de Chile, Santiago. Estos resultados significan que si se aplica el modelo de la UCSB para la estimación de daños y pérdidas, arrojará valores mucho mayores que si se emplea el plano de la falla propuesto por el USGS. De lo anteriormente apuntado cabe concluir que lo realmente importante para la estimación de daños es la cercanía de las exposiciones de interés (sean edificios o infraestructuras) al plano de ruptura, más que al epicentro del terremoto.

En definitiva, las complejidades que entraña la determinación de los parámetros sismológicos para una rápida estimación de daños son considerables, al igual que lo es el grado de incertidumbre inherente a dicha evaluación. Cómo se tratan estas incertidumbres, es algo que sobrepasa el ámbito del presente artículo.



Santiago de Chile

Comportamiento estructural de los edificios

Unos días después de que el terremoto de Maule sacudiese Chile, AIR Worldwide organizó un estudio de campo de los daños ocurridos, parcialmente en colaboración con el Earthquake Engineering Research Institute (EERI). En el presente apartado, se ofrece una síntesis del comportamiento estructural de los edificios de Chile durante el terremoto y un breve historial de la evolución del diseño de edificios y las prácticas de construcción chilenas.

Observaciones del estudio de campo

El equipo investigador visitó una zona afectada por el terremoto, que se extendía unos 600 km a lo largo de la costa y 100 km hacia el interior. Entre las localidades visitadas se encontraban Santiago, Valparaíso, Viña del Mar, Talca, Constitución, Concepción y Dichato.

En cuanto a los daños a edificios no asegurables, un ejemplo de su comportamiento estructural se observó en el centro histórico de Talca, la capital de la Región de Maule. Aquí, los edificios residenciales están hechos predominantemente de adobe. Alrededor de 1.500 hogares de adobe quedaron destruidos o estaban en curso de demolición cuando se realizó el estudio (figura 6). Estos dramáticos efectos sobre las casas de adobe se observaron igualmente durante el terremoto de Pisco (Perú), en 2007 (Alarcon et al., 2008), lo que subraya la extrema vulnerabilidad del adobe no reforzado frente a las fuerzas laterales inducidas por el terremoto.

Con respecto a los edificios construidos según las normas sismorresistentes de ingeniería civil (considerados, en general, como asegurables), la mayoría de las estructuras se comportó muy bien, con sólo algunas excepciones. Se observaron ejemplos de daños graves en Concepción, donde varias estructuras tendrán



Figura 6. Desplome y demolición de estructuras de ladrillo de adobe en Talca
(Fuente: AIR)

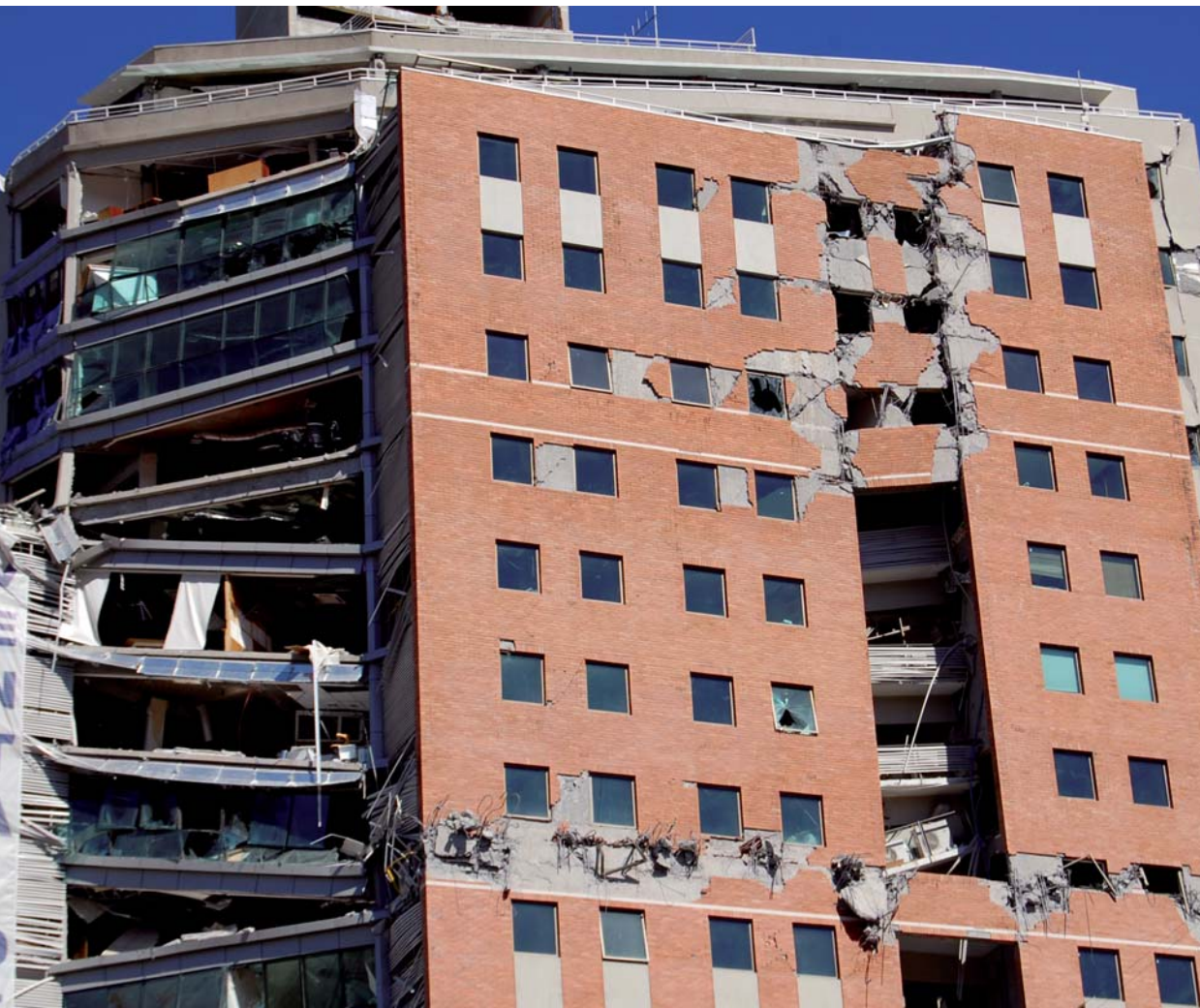


Figura 7. La Torre O'Higgins, en Concepción

Figura 8. Edificio totalmente desplomado, en Concepción
(Fuente: AIR)



que ser derribadas a causa de colapsos parciales en algunas plantas localizadas. En el momento de la visita, el ayuntamiento de la ciudad consideraba que habría que demoler un total de ocho edificios, mientras que otros 48 requerirían inspecciones en profundidad para evaluar si pueden repararse. En la actualidad, el número de edificios programados para su demolición ha aumentado en general, incluyendo aquéllos que sufrieron daños graves, aunque localizados, en sus estructuras.

Aunque todavía se están realizando estudios detallados para averiguar las razones exactas por las cuales fallaron algunas estructuras modernas en este terremoto, según las observaciones de campo parece que un motivo fundamental podría haber sido la falta de regularidad vertical.

Por regla general, las irregularidades verticales pueden aparecer en una estructura debido a variaciones estructurales en las plantas superiores o a diferencias de rigidez de los elementos verticales. Uno de estos casos es la práctica de reducir la sección de los muros verticales en los niveles destinados a aparcamientos, con objeto de proporcionar más espacio para la maniobrabilidad de los automóviles. Esto induce una concentración de esfuerzos de compresión en los muros de dichas plantas, lo que, unido a la flexión sufrida durante el terremoto, podría haber desencadenado el fallo de los elementos verticales.

En Chile, los edificios construidos según las normas sismorresistentes de ingeniería civil se apoyan de forma importante sobre muros de cortante. Éstos son muros masivos de hormigón armado en la estructura, que están diseñados para resistir una gran parte de las fuerzas

laterales que genera un terremoto. Muchos de los edificios modernos existentes respondieron bien, pero hubo excepciones en las que los inmuebles sufrieron colapsos parciales debido a daños severos en los muros de cortante de hormigón (figura 9). La inspección del refuerzo longitudinal de los muros sugiere que las barras de acero sufrieron un pandeo debido a esfuerzos de compresión excesivos en los bordes de los muros y al insuficiente confinamiento del hormigón. El especial confinamiento del hormigón en los bordes de los muros de cortante se conoce normalmente como “elemento de contorno” y le proporciona al muro una mayor capacidad de resistencia a las cargas sísmicas. La ausencia de estos elementos de contorno puede haber sido principalmente responsable del fallo de elementos verticales (véase la figura 10).

Las normas de diseño chilenas

Como cabe esperar en todo país propenso a sufrir terremotos, en Chile se han establecido normas de diseño sismorresistente, que se han ido actualizando de acuerdo con las lecciones aprendidas de anteriores siniestros. En otras palabras, los terremotos que han sacudido zonas en las que no existían previamente normas antisísmicas, produjeron importantes daños en estructuras vulnerables no construidas para hacer frente a los temblores, y ello dio lugar a una revisión de las prácticas de edificación. Una vez promulgada una nueva norma, los terremotos subsiguientes ponen de relieve los defectos de los nuevos diseños sismorresistentes, y a través de este proceso iterativo se van sucediendo unos edificios cada vez menos vulnerables. Ha de observarse que este proceso evolutivo también puede verse afectado por vacíos a la hora de hacer cumplir en la práctica la normativa de edificación, o por la introducción de nuevos materiales o técnicas que igualmente pueden dar lugar a la aparición de nuevas vulnerabilidades.

Como se expuso anteriormente, Chile ha sufrido un elevado número de terremotos de gran magnitud y, en consecuencia, la normativa chilena de diseño sismorresistente ha sido actualizada en varias ocasiones. Las primeras normas promulgadas al respecto lo fueron en la década de 1930, tras el terremoto de Talca de 1928, de 7,6 Mw. Ulteriores revisiones de las normas se produjeron después del terremoto de Chillán, de 1939, del seísmo de Valdivia, de



Figura 9. Daños severos en los muros de cortante
(Fuente: AIR)

Figura 10. Gran pandeo de las barras de refuerzo vertical, agravado por la falta de suficiente refuerzo lateral o confinamiento
(Fuente: AIR)



1960 (el mayor terremoto jamás registrado mediante instrumentos), y del terremoto de Valparaíso, de 1985. La figura 11 resume estos eventos sísmicos y las correspondientes fechas en que se actualizó la normativa.

En la actualidad, la norma chilena de diseño del hormigón armado es muy rigurosa y, en esencia, es una adaptación del código ACI318-95 de los EE.UU., con unas pocas excepciones.

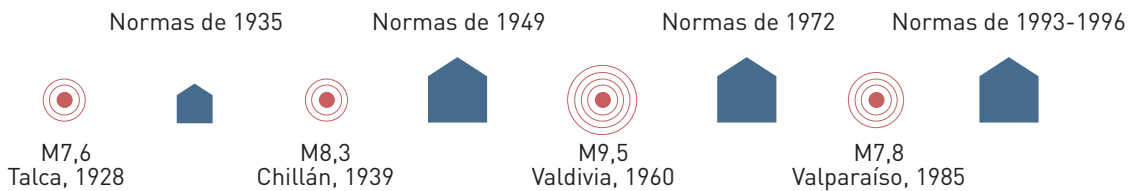
Una de dichas excepciones se refiere a que no se ha adoptado plenamente el código estadounidense en lo relativo a los elementos de contorno en muros de cortante. Esta decisión se tomó debido a las prácticas históricas de construir muros verticales fuertes y de gran

sección que habían respondido excelentemente en los seísmos pasados. Sin embargo, esta falta de elementos de contorno, junto con la continua reducción de la sección de los muros por razones arquitectónicas, ha sido puesta de relieve durante el análisis de este seísmo como una de las causas potenciales de los daños observados en los edificios modernos.

Chile ha reaccionado con rapidez a la hora de extraer las lecciones del terremoto de Maule (Franco y Siembieda, 2010). Uno de los ejemplos más destacados lo constituye un nuevo borrador para modificar el código de edificación, que revisa la realización de elementos de contorno y aumenta los requisitos del diseño. Está previsto que el gobierno apruebe pronto dicho borrador.

Figura 11. Evolución de las normas chilenas de diseño sísmico

Las fechas de la parte superior indican el año de actualización de la norma, y las de la parte inferior señalan los terremotos que desencadenaron las actualizaciones. El tamaño relativo de las estructuras refleja el volumen de la revisión. (Fuente: AIR)





Valparaíso, Chile

Riesgos de futuros terremotos

Una evaluación fiable de la amenaza sísmica supone procesos muy complejos y requiere diversos datos de entrada que pueden no estar disponibles en todas las partes del mundo. Allí donde se dispone de información de elevada calidad, la comprensión de la sismicidad regional mejora en gran medida, aunque, sin embargo, subsisten importantes incertidumbres. No es posible realizar ninguna “predicción sísmica” con la tecnología actual. En lugar de ello, hay que basarse en evaluaciones probabilísticas de la frecuencia e intensidad potencial de futuros eventos sísmicos. No es sorprendente que el potencial de futuros terremotos en Chile siga siendo un tema estudio. El presente apartado describe a grandes rasgos la influencia potencial que el terremoto de Maule puede haber ejercido sobre la sismicidad de la región.

Con respecto al futuro riesgo sísmico en Chile, es importante abordar la noción de “vacío sísmico”, que puede definirse como una zona de una región sísmica activa, donde la acumulación de esfuerzos ha ocurrido durante

un largo periodo, pero donde no se ha registrado un terremoto importante recientemente, por lo que se considera que “debe ocurrir” uno. El terremoto de Maule liberó una energía que se había acumulado durante aproximadamente 170 años, rellenando un vacío sísmico previamente observado en la región. Para esta zona concreta y basándose en medidas de GPS, Ruegg et al. (2009) habían estimado que en torno a Concepción “debía ocurrir” un evento sísmico con una magnitud entre 8,0 y 8,5. El terremoto de Maule, de 8,8 Mw, fue incluso mayor de lo estimado por Ruegg et al. (2009).

A consecuencia de la energía liberada durante el terremoto de Maule, los esfuerzos de las placas tectónicas pueden haberse transferido a segmentos de la falla situados inmediatamente al norte y al sur del plano de ruptura (véase la figura 5). Si es así, ello sugeriría que la ocurrencia de un terremoto en dichos segmentos es ahora más probable. No obstante, a este respecto, Shen-Tu y Mahdyar (2010) han señalado el hecho de que ya se han registrado eventos de gran magnitud recientemente (en el intervalo de unos 70

Está previsto que el gobierno chileno apruebe próximamente un nuevo borrador del código de construcción que incrementa los requisitos del diseño sismorresistente



años) en dichos segmentos, por lo que éstos aún no estarían suficientemente “maduros” para romper de nuevo con un terremoto de elevada magnitud a corto plazo. Con respecto a otras regiones de Chile, Shen-Tu y Mahdyiar (2010) subrayan la existencia de dos potenciales vacíos sísmicos más al norte de la región de Maule, en las regiones de Arica y Tarapacá, cerca de la frontera con Perú. Los últimos seísmos de gran magnitud ocurridos en estas regiones se registraron en 1868 y 1877, con magnitudes correspondientes de 8,8 Mw y 8,3 Mw, respectivamente.

Más detalles sobre la evaluación del riesgo de terremoto tras el evento de febrero de 2010 se encuentran en Shen-Tu y Mahdyiar (2010), donde se examina una serie de planteamientos. La conclusión que puede extraerse con certeza es que, debido al marco tectónico y a la actividad sísmica en torno a Chile, en el pasado han ocurrido terremotos de gran magnitud y sin duda volverán a ocurrir en el futuro. Estimar cuándo pueden producirse estos eventos y qué intensidad pueden alcanzar, son precisamente los desafíos a que se enfrenta la comunidad científica.

Conclusiones

El terremoto de Maule es, hasta la fecha, la catástrofe natural que ha producido las mayores pérdidas aseguradas de 2010. El evento ocurrió en una región de elevada sismicidad y donde históricamente se han producido seísmos de gran magnitud. En este sentido, se espera que en Chile vuelvan a ocurrir en el futuro terremotos de elevada magnitud. Por esta razón, las autoridades chilenas han desarrollado un riguroso código de diseño sísmico y ordenado buenas prácticas de construcción que, con pocas excepciones, han producido respuestas estructurales adecuadas de los edificios durante el terremoto de 8,8 Mw.

Referencias

<http://www.air-worldwide.com>

Alarcon, J.E., Taucer, F. and So, E. (2008). The 15 August 2007 Pisco, Peru, Earthquake – Post Event Field Survey. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing. Paper 01-1067.

AIR Worldwide (2009). The AIR Earthquake Model for Chile <http://www.air-worldwide.com/Client-Support.aspx>

Franco, G. and Siembieda, W. (2010). “Chile’s 2010 M8.8 Earthquake and Tsunami: Initial Observations on Resilience.” *Journal of Disaster Research*, 5 (5), pp. 577-590.

NGDC - National Geophysical Data Center (2010). NOAA/WDC Historical Tsunami Data Base, <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/>

Ruegg, J.C., A. Rudloff, C. Vigny, R. Madariaga, J.B. de Chabaliar, J. Campos, E. Kausel, S. Barrientos and D. Dimitrov (2009). Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175, 78-85.

Shen-Tu, B. and M. Mahdyiar (2010). Earthquake Risk in Chile after February 2010. *AIR Currents*, August 2010, <http://www.air-worldwide.com/>

USGS – United States Geological Survey (2010). <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>

Se han detectado dos potenciales vacíos sísmicos más al norte de la región de Maule, en las regiones de Arica y Tarapacá, cerca de la frontera con Perú