

La serie sísmica de Canterbury (Nueva Zelanda) en 2010-2011: análisis sísmológico, daños observados y consecuencias

Dr. Kelvin Berryman
Director de la Plataforma Nacional de Investigación sobre Desastres Naturales GNS Science¹

GNS Science

Dr. Mathew Gerstenberger, *sismólogo e investigador sénior*
Dr. Terry Webb, *Director del Departamento de Desastres Naturales*
Dra. Pilar Villamor, *geóloga e investigadora sénior*
Dr. Chris Massey, *ingeniero geólogo*

Dra. Lindy Fursman, *analista sénior del Departamento del Tesoro de Nueva Zelanda*



«Las lecciones aprendidas en Christchurch en términos geotécnicos, de ingeniería estructural y de riesgo, se están teniendo muy en cuenta en todo el país»

¹ GNS Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited:
<http://www.gns.cri.nz>

1 EUR = 1,54 NZD;
1 USD = 1,25 NZD
a julio 2012



Vista aérea de Christchurch en septiembre de 2011

Resumen

El terremoto de Darfield (7,1 Mw) sacudió la región de Canterbury, en la zona centro de la Isla Sur de Nueva Zelanda, a las 4:36 h del 4 de septiembre de 2010. No hubo ningún muerto y solo dos personas sufrieron heridas de gravedad. Era el primer terremoto fuerte que impactaba en una de las principales zonas urbanas de Nueva Zelanda desde el terremoto de la Bahía de Hawke en 1931, que catalizó la in-

troducción de normativas de construcción antisísmica en este país. En el transcurso de estos años, se introdujeron y aplicaron diversas mejoras en el código sísmico, aunque hasta entonces los niveles máximos de diseño no se habían puesto a prueba durante movimientos fuertes del terreno.

Tras el terremoto de Darfield, los hospitales continuaron funcionando, la electricidad se restableció en poco tiempo, no se derrumbó ningún edi-



ficio y la reacción ante la emergencia fue rápida y eficaz. Sin embargo, el coste de los daños ascendió a más de 3.000 millones de USD, en su mayoría derivados de los fenómenos de licuefacción y de la deformación del terreno, que produjeron el derrumbamiento parcial de algunas viviendas de construcción reciente y que causaron importantes daños tanto en la red de abastecimiento de agua potable como en la red de aguas residuales. Los edificios de mampostería no reforzada también sufrieron graves daños. La ausencia de víctimas mortales en este caso puede atribuirse al hecho de que el terremoto se produjera en plena madrugada y a la buena suerte.

Casi seis meses después, se produjo una devastadora réplica de 6,2 M_w cerca de la ciudad de Christchurch, en el perímetro exterior de la zona de réplicas en expansión asociada al seísmo principal de septiembre. Este terremoto se produjo a las 12:51 h, una hora en la que cerca de cincuenta mil personas se encontraban en el centro urbano, caracterizado por sus edificios históricos y por un gran número de edificaciones de mampostería no reforzada. Los violentos movimientos del terreno, que superaron el cien por cien de la aceleración de la gravedad en el centro urbano y en los barrios periféricos de las laderas al sur de la ciudad, produjeron muchos fallos estructurales. El número final de víctimas mortales fue de 181. Muchos fallecieron al derrumbarse dos edificios de varios pisos. En los barrios residenciales periféricos, las fuertes vibraciones del seísmo y, sobre todo, la amplia y devastadora licuefacción, produjeron graves daños. En términos generales, los edificios construidos de acuerdo con los códigos sismorresistentes modernos, soportaron movimientos del terreno con valores iguales o superiores a los establecidos en su diseño. Se estima que los daños causados por este terremoto totalizaron en torno a los 30.000 millones de USD, lo que representa aproximadamente un ocho por ciento del PIB anual de Nueva Zelanda.

La serie sísmica

El seísmo principal de Darfield de septiembre de 2010

El terremoto de Darfield, de 7,1 M_w , tuvo lugar el 4 de septiembre de 2010 a las 4:35 hora local (es decir, el 3 de septiembre a las 16:35

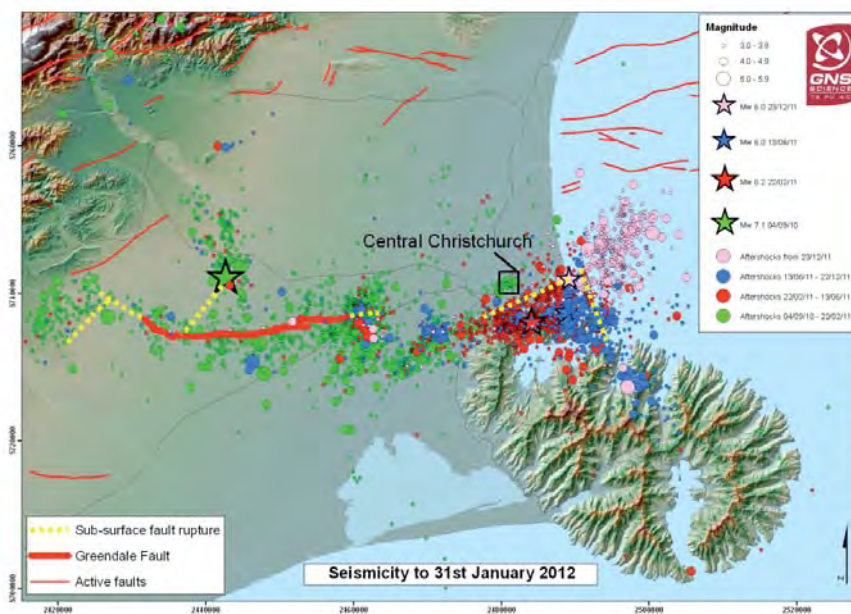


Catedral Católica en Madrás Street tras el terremoto de 2011 en Christchurch

UTC), aproximadamente a cuarenta kilómetros al oeste de la ciudad de Christchurch (la segunda ciudad más grande de Nueva Zelanda, con una población de 375.000 habitantes) en un falla desconocida hasta el momento y situada en las llanuras de Canterbury (Figura 1). Este extraño acontecimiento, cuyo periodo de retorno se calcula que es de varios miles de años (Stirling et al., 2002), se produjo en una región con una sismicidad relativamente baja de la zona oriental de la Isla Sur de Nueva Zelanda. No hubo víctimas mortales y solo algunas personas resultaron heridas. En Christchurch, el seísmo causó daños en edificios antiguos de mampostería y ladrillo y en edificios históricos de madera y piedra. El terremoto también produjo licuefacción y desplazamientos laterales a lo largo de la cuenca baja de los ríos que atraviesan los barrios periféricos de la zona este de Christchurch (cerca de la costa) y la ciudad de Kaiapoi (a unos veinte kilómetros al norte). Las redes de abastecimiento y colectores de aguas reventaron y muchas calles se inundaron.



Figura 1: Serie sísmica que afectó a Canterbury hasta el 31 de enero de 2012. Los terremotos de mayor magnitud se han representado en forma de estrellas, incluido el seísmo principal que afectó a Darfield en septiembre de 2010 (en verde) y los terremotos de febrero (en rojo), junio (en azul) y diciembre (en rosa) de 2011 en Christchurch. Las líneas amarillas de puntos representan la ruptura bajo la superficie de las fallas secundarias que se crearon durante el terremoto de Darfield (Holden, 2011) y el de Christchurch en febrero de 2011.



Desde el terremoto de Darfield, la red nacional de sismógrafos de Nueva Zelanda (GeoNet: <http://www.geonet.org.nz/>) ha registrado más de siete mil réplicas con magnitudes de hasta 6,2 M_w . Esta sucesión de movimientos sísmicos se denomina la «serie sísmica de Canterbury». En los meses posteriores al seísmo de Darfield, las réplicas se concentraron especialmente en el extremo oriental de la Falla de Greendale y se extendieron en dirección este hacia la ciudad.

El terremoto de Christchurch en febrero de 2011

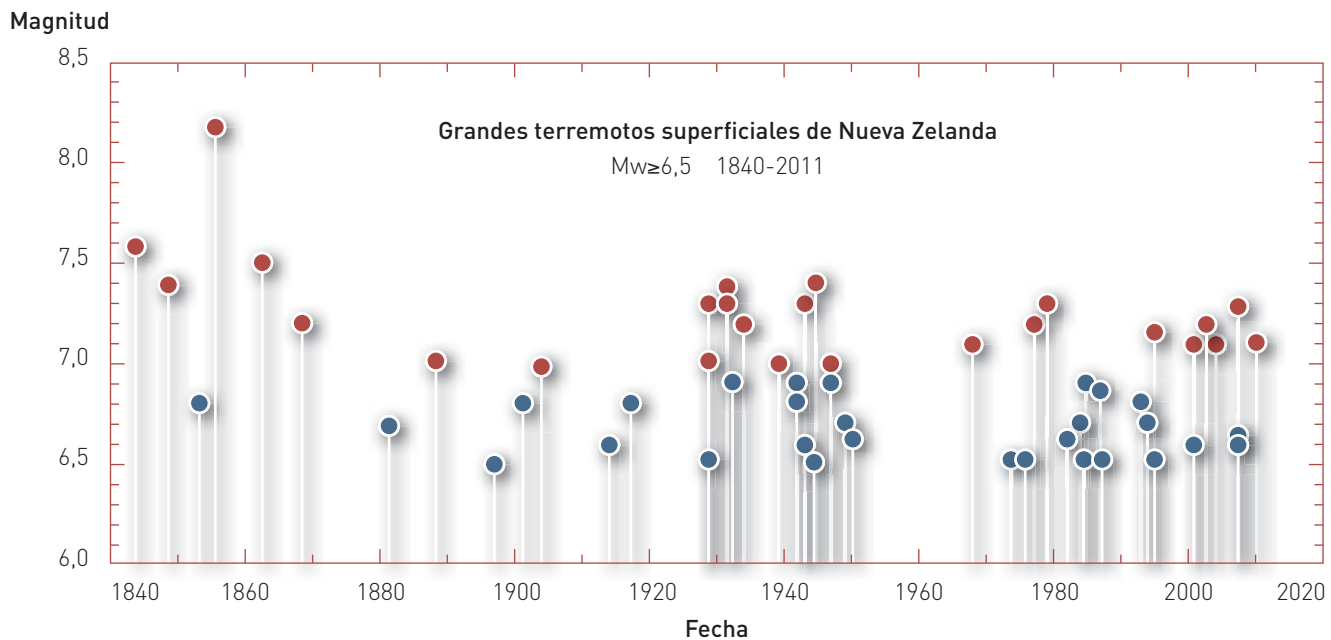
El terremoto más destructivo de los que conformaron la serie sísmica de Canterbury se produjo a las 12:51 (hora local) del 22 de febrero de 2011, cinco meses y medio después del seísmo principal de Darfield. Esta réplica de 6,2 M_w (denominado el «terremoto de Christchurch») se originó en el extremo oriental de la zona de réplicas. Su epicentro se situaba a tan solo seis kilómetros al sudeste del centro urbano de Christchurch (representado con una

estrella roja en la Figura 1). Durante el terremoto de Christchurch, se registraron aceleraciones especialmente altas, lo cual causó graves daños en los edificios, licuefacción en áreas muy extensas y deslizamientos de tierras. El terremoto del 22 de febrero incrementó la actividad sísmica con varias réplicas de magnitud importante (por encima de 5 M_w).

El terremoto de Christchurch ha sido el que más víctimas mortales ha causado en Nueva Zelanda desde el de la Bahía de Hawke (más conocido como el terremoto de Napier) en 1931, con 181 muertos y varios miles de heridos. Aproximadamente dos tercios de las muertes se debieron al derrumbamiento de dos edificios de oficinas de varios pisos de altura. Uno de ellos había sido diseñado y construido en los años sesenta y el otro, en los años ochenta. También murieron muchas personas en las calles por caída de trozos de ladrillos desde los edificios, y en dos autobuses que quedaron aplastados por los escombros. Cinco personas murieron en los barrios periféricos



Figura 2: Terremotos fuertes y someros en Nueva Zelanda. La distribución de los terremotos de una magnitud igual o superior a 6,5 desde 1840 a la actualidad, muestra una tendencia hacia la agrupación de sismos fuertes en torno a 1850 (es posible que los seísmos por debajo de los siete grados no se hayan registrado adecuadamente) y en los años treinta y cuarenta. La incidencia de terremotos de una magnitud por encima de los siete grados (puntos rojos) ha aumentado a partir de 1994 aproximadamente, aunque sigue sin estar claro si se trata o no, del inicio de un nuevo enjambre o *cluster*.



de las laderas al sur de la ciudad a causa del derrumbamiento de los acantilados de roca y el desprendimiento de piedras de gran tamaño. El terremoto derribó muchos edificios que ya se habían visto afectados por el terremoto de septiembre de 2010. Muchos edificios históricos sufrieron graves desperfectos. Asimismo, varios edificios modernos experimentaron daños irreparables, incluido el edificio más alto de Christchurch. La licuefacción se extendió aún más que en el terremoto de Darfield y se produjo en varios barrios periféricos a los que no había afectado durante el seísmo de septiembre.

El terremoto de Christchurch en junio de 2011

El 13 de junio de 2011 a las 14:20 hora local, se produjo un terremoto 6 Mw cerca del barrio periférico de Sumner (representado con una estrella azul en la Figura 1). Este terremoto produjo en Christchurch una víctima mortal y aún más daños materiales, deteriorando de forma irreparable muchos edificios del distrito CBD (*Christchurch Business District*), cuya restaura-

ción ya estaba planificada. Una vez más, el seísmo generó aceleraciones muy elevadas en los barrios periféricos del sur y del este, lo que llevó a que la licuefacción afectara a un área más amplia y a que se desprendieran rocas de los acantilados en los barrios periféricos construidos sobre laderas.

El terremoto de Christchurch en diciembre de 2011

El 23 de diciembre de 2011, dos días antes de Navidad, un terremoto 5,8 Mw sacudió el este de Christchurch. El terremoto fue localizado en el mar unos metros más allá de la costa a las 1:58 pm hora local. Así como en otros terremotos con niveles de sacudida semejantes, hubo casos de licuefacción en los suburbios orientales de la ciudad. La nueva serie de réplicas se desarrolló más hacia el este que la serie asociada al terremoto del 13 de junio. Al estar situada más lejos de las zonas pobladas y tener magnitudes máximas menores, los efectos de la serie de diciembre de 2011 fueron menos dañinos para las estructuras que en casos anteriores. La longevidad de

la secuencia completa de los terremotos de Canterbury (15 meses) y la subsiguiente serie de réplicas a lo largo de aquella tarde y noche, generaron síntomas de ansiedad y sentimientos de desesperanza en la población debido al momento del año, justo antes de las vacaciones de Navidad.

Predicción sísmica

A día de hoy, el nivel de peligrosidad sísmica en Canterbury es superior a lo esperable a largo plazo y es probable que se mantenga así durante varias décadas debido a la combinación de una sucesión de numerosas réplicas y a la posibilidad de que un terremoto de magnitud comparable al de Darfield pueda producirse nuevamente en la región. Esta propensión a que los terremotos fuertes se distribuyan en el tiempo de forma irregular y que se concentren en el tiempo (a estas series sísmicas se les denomina «enjambres» o *clusters*) se ha observado también en los terremotos más importantes que ha sufrido Nueva Zelanda a lo largo de su historia. La Figura 2 muestra la distribución temporal de los terremotos de una magnitud igual o superior a 6,5 que han afectado a Nueva Zelanda en su historia reciente (desde 1840). A mediados de los años ochenta y en los años treinta y cuarenta se produjeron enjambres de terremotos fuertes y desde 1994 es probable que estemos viviendo el inicio de un nuevo enjambre.

El diseño antisísmico empleado en Nueva Zelanda se rige por el *New Zealand Loadings Standard* (estándar de cargas de Nueva Zelanda) o NZS 1170. Este estándar se basa en la sismicidad de fondo normal anterior a 2010 (Stirling et al., 2002). Para poder contar con un diseño antisísmico adecuado cuando se reevalúe la seguridad de las estructuras ya existentes y en el diseño de los nuevos edificios e infraestructuras construidos en Christchurch y en sus alrededores, es necesario incorporar los nuevos niveles incrementados de sismicidad. Para ello, se ha desarrollado un nuevo modelo de peligrosidad sísmica que tiene en cuenta la variación de la sismicidad a lo largo del tiempo y se han creado nuevos coeficientes de diseño antisísmico (Gerstenberger et al., 2011; Webb et al., 2011).

Contexto geotectónico

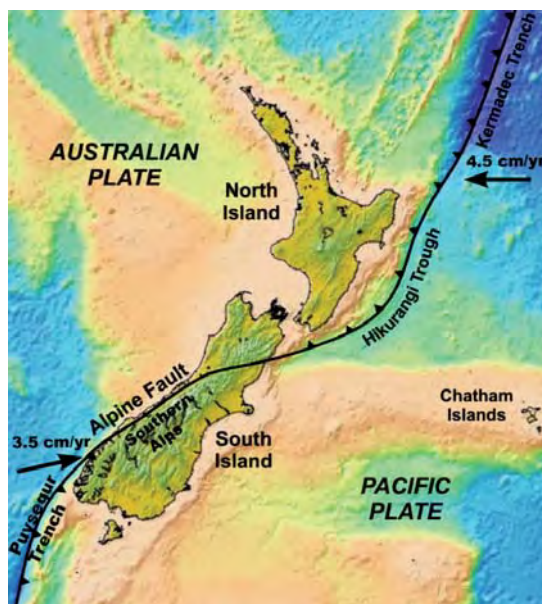
Nueva Zelanda se encuentra en una zona límite a caballo entre la placa australiana y la del Pacífico, con un movimiento relativo entre ambas a una velocidad de 35-45 mm/año (Figura 3).

En la Isla Norte, las placas convergen y la corteza oceánica de la placa del Pacífico, más delgada, se desliza en dirección oeste, por debajo de la zona oriental de la Isla Norte a lo largo de la Fosa de Hikurangi. Esta subducción también se produce mar adentro y en el área meridional de la Isla Sur, salvo que aquí la fina corteza oceánica de la placa australiana se desliza en dirección este, por debajo de Fiordland a lo largo de la Fosa de Puysegur. Sin embargo, en la zona central y septentrional de la Isla Sur, la corteza de la placa del Pacífico y de la placa australiana es más gruesa, por lo que no puede producirse la subducción. El origen de la deformación tectónica es la falla de desgarre que se produce a lo largo de la zona de contacto, al desplazarse la costa oeste en dirección nordeste respecto al resto de la Isla Sur a un ritmo de aproximada-

Nueva Zelanda se encuentra en una zona límite a caballo entre la placa australiana y la del Pacífico, con un movimiento relativo entre ambas a una velocidad de 35-45 mm/año

Figura 3: Situación de las placas tectónicas en Nueva Zelanda.

La flecha en la esquina superior derecha que señala hacia el oeste representa el movimiento convergente de la placa del Pacífico hacia la placa australiana (zona septentrional de Nueva Zelanda), mientras que la flecha en la esquina inferior izquierda que señala hacia el nordeste representa el movimiento de la placa australiana respecto de la placa del Pacífico (zona meridional de Nueva Zelanda).



mente treinta milímetros al año, principalmente en la Falla Alpina (Berryman et al, 1992; Norris y Cooper, 2001). A esto se suma que la placa del Pacífico y la placa australiana chocan frontalmente a una velocidad de entre aproximadamente cinco y diez milímetros al año (Beavan et al., 2002), lo que originó la creación de los Alpes del Sur hace algunos millones de años.

El territorio situado al este de la Falla Alpina también se encuentra dividido por una compleja red de fallas geológicamente activas, materializándose el 25% del movimiento restante de la placa en forma de terremotos ocasionales en dichas fallas (Cox y Sutherland, 2007; Pettinga et al., 2001, Wallace et al., 2007) (Figura 4).

Las mediciones GPS sugieren que las líneas de falla situadas en la región de las llanuras de Canterbury concentran aproximadamente el cinco por ciento del movimiento global de la placa Pacífico-australiana a una media de entre aproximadamente uno y dos milímetros al año (Wallace et al., 2007). Desde septiembre de 2010, las pautas seguidas por las réplicas y los estudios geofísicos de la subsuperficie han revelado la existencia de varias fallas anteriores cuya existencia se desconocía (Figura 1).

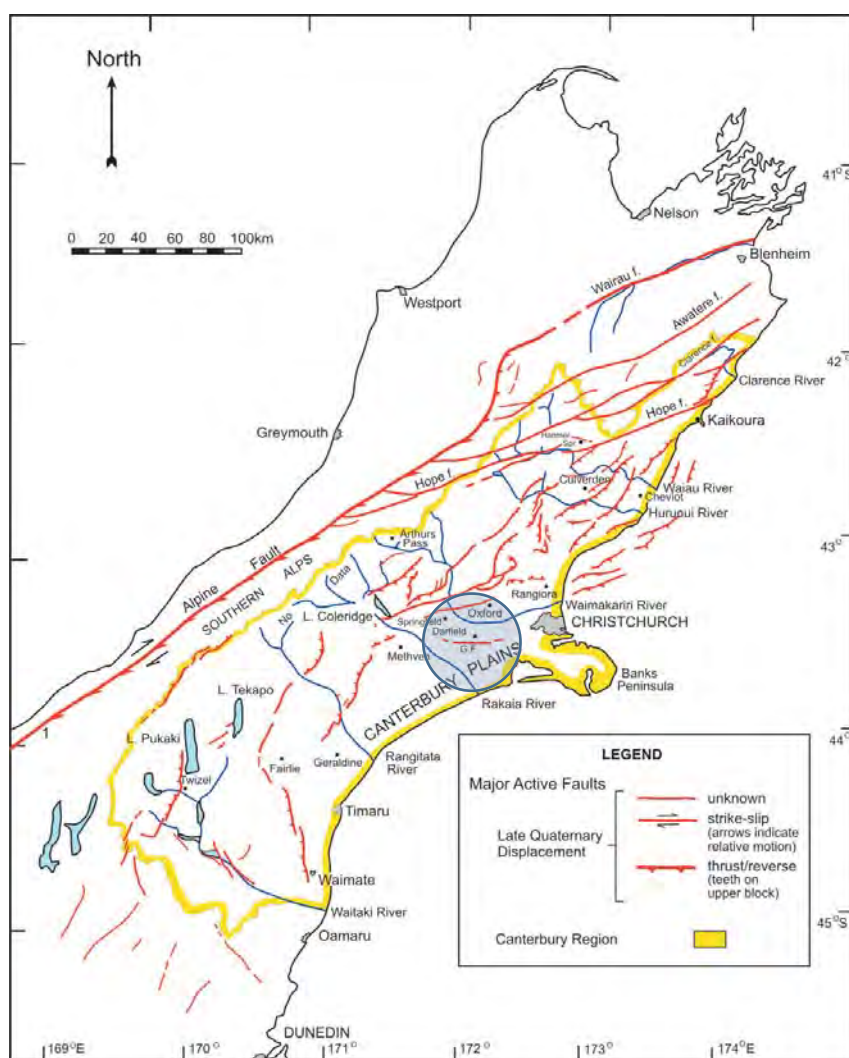
Comparación de las disposiciones del código de construcción de Nueva Zelanda frente a movimientos fuertes del terreno

El estándar de diseño de Nueva Zelanda o NZS 1170 establece las pautas para determinar los distintos niveles de movimiento del terreno esperables para periodos de retorno de quinientos, mil y dos mil quinientos años para estructuras "de uso normal", "de uso extensivo" y "de uso postcatástrofe", respectivamente. Durante la serie sísmica que se registró en el periodo 2010-2012, la ciudad de Christchurch experimentó distintos rangos de movimiento del terreno que, en ciertas ocasiones, sobrepasaron los niveles de diseño tal y como se describe a continuación.

El sismo principal de Darfield en septiembre de 2010

El terremoto de Darfield (de una magnitud de 7,1 Mw) se originó en una falla desconocida hasta entonces: la Falla de Greendale (Figuras 1 y 5). Esta falla no había sido identificada antes de 2010, pero los desplazamientos que se produjeron a lo largo de la misma durante el terremoto del 4 de septiembre pusieron de manifiesto una línea de ruptura en la superficie del terreno. La rotura de la superficie del terreno se extiende a lo largo de aproximadamente 29,5 kilómetros, principalmente ocupados por tierras de cultivo utilizadas para el pastoreo y edificios de poca altura (Figura 5). El movimiento fue principalmente horizontal (falla de desgarre), lo que ocasionó el desplazamiento de cercados, carreteras, tendidos eléctricos y vías férreas en sentido dextral. El desplazamiento medio fue de aproximadamente 2,5 m (con un máximo de cerca de 5 m) en sentido horizontal y de aproximadamente 1,5 m en sentido vertical (Quigley et al.,

Figura 4: Mapa de las fallas activas de las que se tiene conocimiento en la región de Canterbury, incluida la recién formada Falla de Greendale (G.F.). Figura modificada a partir de Pettinga et al. (1998).



2010; 2011). La información de los sismógrafos y GPS, así como el procesamiento de los datos obtenidos mediante radar satélite (InSAR) pusieron de manifiesto que la falla que se había identificado no era la única ruptura de falla asociada al terremoto de 7,1 M_w de Darfield. La ruptura causada por el terremoto era, de hecho, el resultado de un proceso muy complejo constituido por la ruptura de varios segmentos de falla, entre ellos, fallas inversas ocultas (de compresión) y de desgarre (Figura 1; Beavan et al, 2010, Holden et al., 2011).

Los movimientos del terreno experimentados en toda la zona durante el terremoto de 7,1 M_w de Darfield fueron muy importantes. Las aceleraciones del suelo alcanzaron 1,26 veces el valor de la aceleración de la Tierra ($1 g = 9,8 m/s^2$) en la zona próxima a la falla y llegaron hasta los 0,3 g en el centro de Christchurch, a más de 35 kilómetros del epicentro. Las aceleraciones horizontales del terreno fueron, por lo general, comparables a las previstas en los modelos de atenuación de las ondas sísmicas de Nueva Zelanda (McVerry 2006; Figura 6), el principal modelo sobre el que se basa el código de construcción nacional. Los valores observados fueron similares a los previstos por este modelo para ondas con un periodo de un segundo, algo que es importante para los códigos de diseño de edificios y para suelos profundos o muy blandos (la atenuación es distinta dependiendo de si se trata de suelos rocosos o blandos). En términos generales, estas aceleraciones difirieron poco respecto de las previstas en el nivel de diseño en el centro de Christchurch (0,3 g), pero las sobrepasaron en el epicentro. Las aceleraciones máximas del terreno, tanto horizontales como verticales, experimentadas en el área urbana de Christchurch fueron registradas por numerosos sismógrafos tal y como se muestra en la Figura 7. Aunque las aceleraciones fueron bajas (todas estuvieron por debajo de 1 g y la mayoría por debajo de 0,3 g), se observaron movimientos inusualmente intensos en onda corta en un barrio periférico al sur de la ciudad (Figura 7A). Estas aceleraciones más altas podrían deberse al efecto de amplificación producido por los suelos blandos y poco profundos de la región y por la estructura de la cuenca (la profundidad y los cambios de profundidad de la cuenca sedimentaria pueden influir en la amplificación de la onda).

La energía liberada (o caída del esfuerzo) durante el terremoto de Darfield fue muy alta para un terremoto de 7,1 - M_w (G. Choy, comunicación personal; Fry y Gerstenberger, 2011). Se han

Figura 5: Ejemplo del desplazamiento de varios cercados por la ruptura superficial de la Falla de Greendale durante el terremoto del 4 de septiembre de 2010 (fotografía de Nicola Litchfield, GNS Science).



Figura 6: Aceleraciones del terreno observadas (para ondas con un periodo de un segundo) durante el terremoto de Darfield (círculos verdes) en comparación con los valores previstos en el modelo nacional de atenuación para suelos profundos o muy blandos (línea azul continua; McVerry et al., 2006) a distintas distancias (km) del epicentro del terremoto.

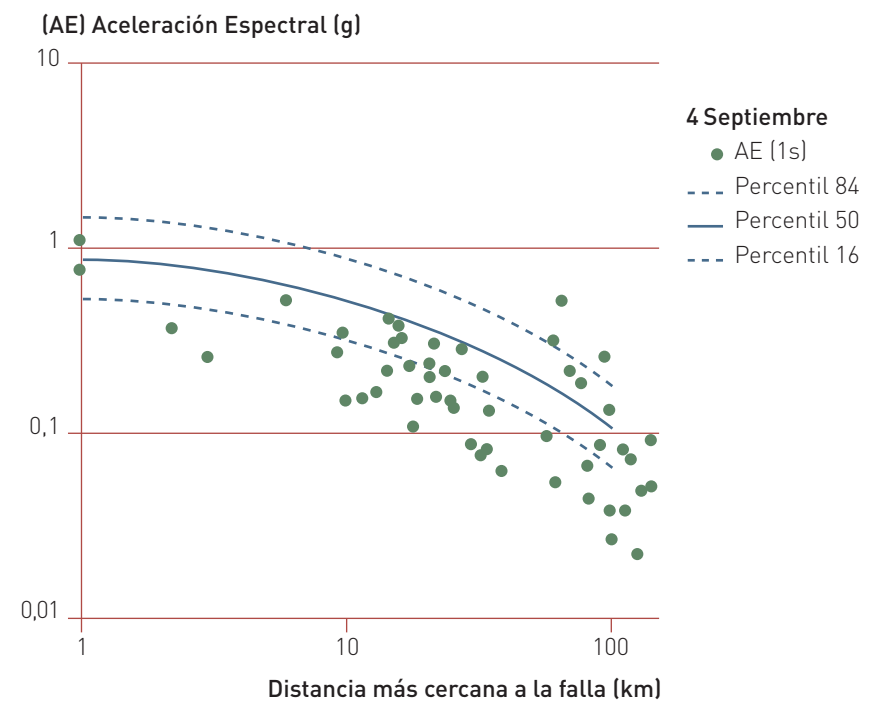
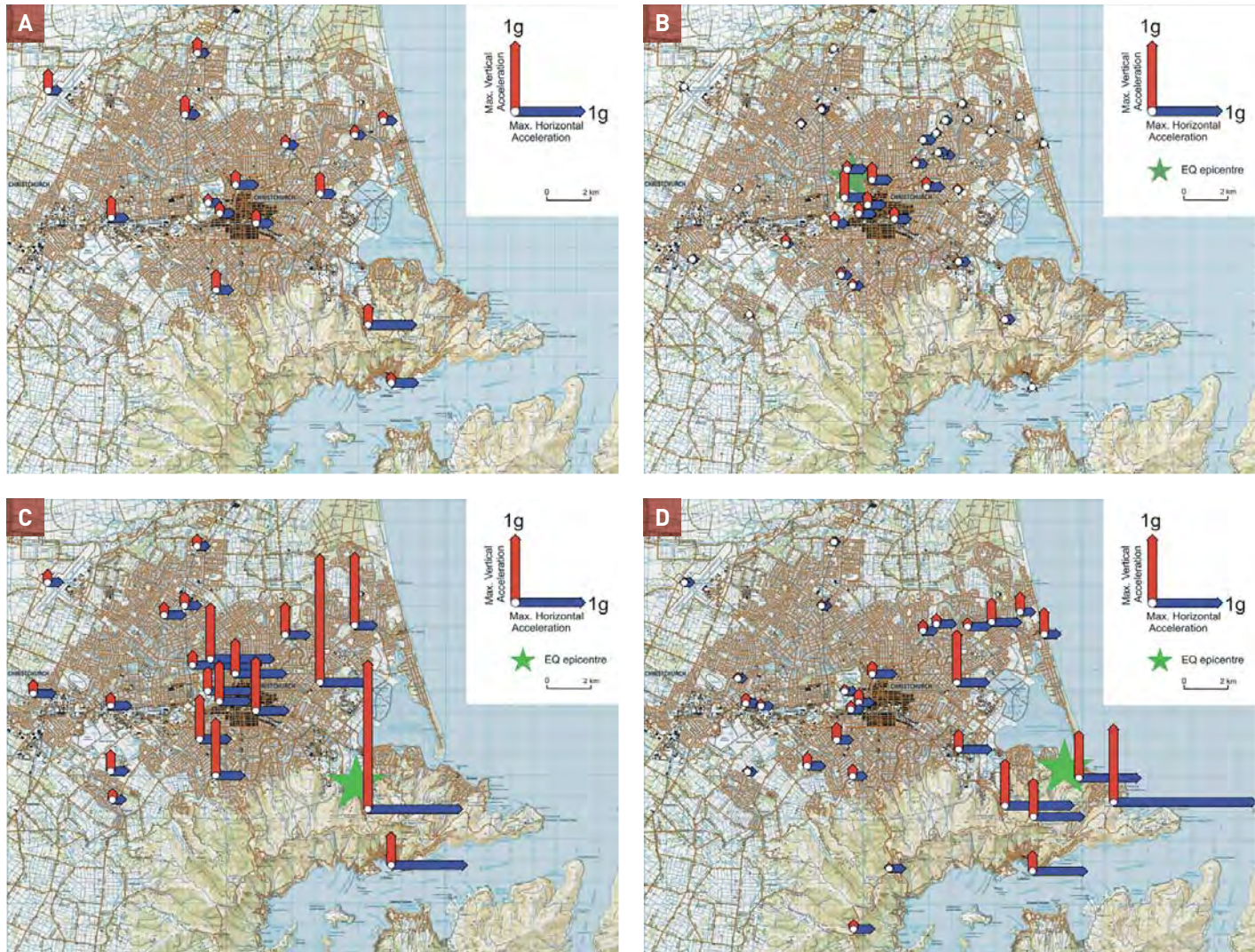


Figura 7: Aceleraciones máximas horizontales y verticales registradas durante el terremoto de Darfield del 4 de septiembre (A), el terremoto de 4,7 grados Mw denominado *Boxing Day* (Día de las Cajas) por producirse durante esta tradicional festividad que se celebra el 26 de diciembre (B), el terremoto de Christchurch del 22 de febrero (C) y el terremoto del 13 de junio desde las estaciones GeoNet y acelerómetros temporales de bajo coste (*Red Quake-Catcher*) (D).



observado características similares (una caída del esfuerzo importante) en todos los terremotos intensos englobados dentro de la sucesión de Canterbury y parecen estar asociadas a regiones de baja sismicidad en las que la tensión se acumula lentamente y la ruptura de la falla presenta periodos de recurrencia largos.

El terremoto de Christchurch en febrero de 2011

El terremoto de 6,2 M_w que afectó a Christchurch el 22 de febrero de 2011 fue, con diferencia, el más destructivo de la serie de Canterbury, manifestándose con violentas vibraciones del suelo en casi toda la ciudad (Figura 7C). El movimiento se origi-

nó en una falla con orientación nordeste-sudoeste y el epicentro, muy somero, estaba a una profundidad de sólo siete kilómetros. El desplazamiento a lo largo de la falla se detuvo a apenas un kilómetro de la superficie, pero no llegó a crear una ruptura visible. No se tenía identificada esta falla antes del terremoto, aunque se habían producido seísmos secundarios en el área epicentral durante los meses anteriores al terremoto de Christchurch. La ruptura presentaba un desplazamiento oblicuo (una combinación entre una falla de desgarre dextral y una falla inversa). Dado que la falla no acabó de manifestarse en la superficie, no pudo medirse el desplazamiento sobre el terreno, pero según los datos geodésicos y sismológicos, la ruptura



produjo un deslizamiento máximo de entre 2,5 m y 4,0 m a una profundidad de entre cuatro y cinco kilómetros [Beavan et al., 2011; Holden 2011].

Los movimientos del terreno experimentados en la ciudad de Christchurch fueron extremadamente fuertes durante el terremoto de febrero y llegaron a alcanzar 2,2 veces la gravedad de la Tierra (g) cerca del epicentro y hasta 0,8 g en el distrito CBD (Figura 7C). En áreas próximas a la falla (a una distancia de menos de cinco kilómetros) las aceleraciones horizontales fueron mayores durante el terremoto de Christchurch que durante el seísmo principal de Darfield [Kaiser et al., 2011; Cousins y McVerry, 2010].

Las aceleraciones registradas durante el terremoto del 22 de febrero fueron superiores a las previstas en el estándar de diseño de Nueva Zelanda para estructuras «de uso normal» (para un periodo de retorno de quinientos años), es decir, el que se utiliza para el diseño de edificios [Webb et al., 2011]. Se cree que fueron varios los factores que contribuyeron a que se produjeran aceleraciones tan elevadas en la ciudad de Christchurch durante el terremoto del 22 de febrero (Fry et al., 2011a; Reyners 2011; Webb et al., 2011), entre ellos, la proximidad y escasa profundidad del epicentro, la rápida caída del esfuerzo (es decir, que se tratara de un movimiento de alta energía) y la direccionalidad de la ruptura de la falla (que apuntaba hacia la ciudad).

El terremoto de Christchurch en junio de 2011

El epicentro del terremoto de 6,0 M_w que se produjo el 13 de junio de 2011 estaba situado más al este que el terremoto del 22 de febrero (Figura 1). El seísmo de junio estuvo precedido por la ruptura de una falla de desgarre dextral. Como en el terremoto del 22 de febrero, las aceleraciones del terreno en Christchurch fueron de nuevo muy altas y, también en esta ocasión, estuvieron asociadas a abruptas caídas del esfuerzo, aunque no a los efectos producidos por la direccionalidad de la ruptura de la falla de febrero (Figura 7D).

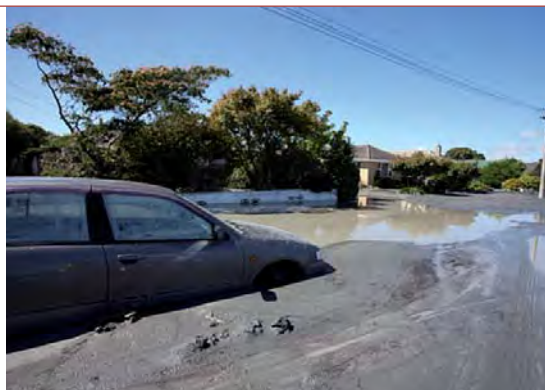
Los movimientos del terreno registrados el 23 de diciembre de 2011 aún no se han analizado.

Deformaciones del terreno: levantamientos y subsidencia, licuefacción y desprendimientos de tierra

Levantamientos y subsidencia

Los niveles del terreno en las distintas zonas urbanas han cambiado considerablemente como resultado de la serie sísmica. Esto se debe a dos factores principales. Por un lado, se ha producido una deformación tectónica a consecuencia de la falla inversa oculta originada el 22 de febrero de 2011 (representada con una línea amarilla de puntos en la Figura 1), lo que ha ocasionado levantamientos en el terreno de hasta 450 mm en la parte meridional de la ciudad y en los

Figura 8: Depósitos producidos por la licuefacción en la zona oriental de la ciudad después del terremoto de Christchurch del 22 de febrero. La retirada de este material ha producido un considerable descenso del nivel del suelo respecto del nivel del mar y la capa freática (fotografías de Tonkin & Taylor Ltd).



La licuefacción se produjo en una zona más amplia de lo que se había previsto en los mapas de susceptibilidad previos al terremoto (más del cincuenta por ciento de la ciudad), aunque los indicadores generales de las áreas susceptibles eran bien conocidos

barrios periféricos ubicados sobre laderas de la zona sur y subsidencia de hasta 150 mm respecto del nivel del mar en los barrios costeros de la periferia y a lo largo de la cuenca baja del río Avon. Y por otro lado, los desplazamientos laterales y la licuefacción (como se explicará a continuación) han originado subsidencia de hasta un metro en ciertas áreas. Los más que evidentes cambios en la elevación respecto al nivel del mar han aumentado el riesgo de inundaciones en ciertas zonas de la ciudad.

Licuefacción

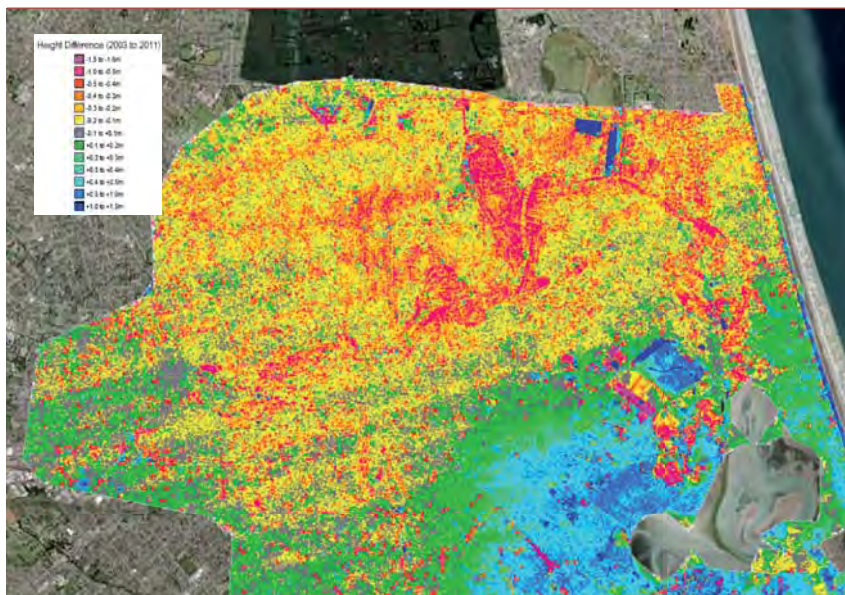
De todos los terremotos que afectaron a Christchurch, el terremoto del 22 de febrero fue el que más daños provocó por la gran intensidad de los movimientos del terreno y a los consiguientes fenómenos extremos de licuefacción y desplazamiento lateral del terreno, o *lateral spreading* (Cubrinovski y Taylor, 2011; Kaiser et al 2011). Los barrios periféricos de la zona oeste de Christchurch están situados sobre depósitos aluvia-

les de grava. Sin embargo, la zona comprendida aproximadamente entre el distrito CBD y la costa, la grava aluvial es más fina y muchos de los barrios periféricos de la zona este de la ciudad están situados sobre sedimentos fluviales muy recientes (de menos de ocho mil años de antigüedad), saturados de agua, procedentes de un estuario y de granulometría fina.

Se observaron diferentes fenómenos generados por la licuefacción, entre ellos, cráteres de arena, asentamientos inducidos por desplazamientos laterales, así como el hundimiento de estructuras hasta tres metros. La licuefacción se produjo en una zona más amplia (más del cincuenta por ciento de la ciudad) de lo que se había previsto en los mapas de susceptibilidad previos al terremoto, aunque los indicadores generales de las áreas susceptibles eran bien conocidos. La gran intensidad de los movimientos del terreno contribuyó al carácter extensivo de la zona de licuefacción, así como el hecho de que el umbral de movimiento del terreno



Figura 9: Imagen LIDAR en la que se muestran las diferencias acumulativas en cuanto a elevación del terreno causadas, principalmente, por la deformación tectónica, los desplazamientos laterales y la retirada de los depósitos generados por la licuefacción a causa del terremoto de Darfield (menor impacto) y el de Christchurch (mayor impacto). Destacan el levantamiento sufrido en la zona del estuario en el cuadrante sudeste y la subsidencia generalizada. Las mayores diferencias se aprecian en la mitad norte de la imagen. El área rectangular de color azul que indica la existencia de un levantamiento al norte del estuario es una aglomeración de los sedimentos asociados a la licuefacción y extraídos de los barrios periféricos de la zona este (imagen cortesía de NZ Aerial Mapping Ltd).



que produjo licuefacción resultó ser muy bajo (con una aceleración máxima de entre tan solo 0,1 g y 0,15 g) en las áreas más susceptibles. En aquellos lugares donde se produjeron desplazamientos laterales, los daños resultantes a viviendas, sistemas subterráneos y cimientos de edificios de varias plantas en el distrito CBD acabaron produciendo, en muchos casos, pérdidas irreparables (Figura 10).

Desprendimientos de tierra

El terremoto que azotó Christchurch el 22 de febrero dejó cinco víctimas mortales por varios desprendimientos de rocas. Estos se produjeron en los barrios periféricos ubicados sobre laderas al sur del distrito CBD de Christchurch, donde el desarrollo urbano se ha extendido hasta el sector septentrional del volcán en escudo, extinto y erosionado de Lyttleton. Las rocas que conforman la cadena montañosa de entre cuatrocientos y quinientos metros de altura, así como las laderas y los acantilados costeros de la zona, tienen una

Figura 10: Ejemplo de los daños irreparables a una vivienda en un barrio periférico de la zona este debido a un desplazamiento lateral (fotografía de Tonkin & Taylor Ltd).



Figura 11: Ejemplo del impacto de una roca de gran tamaño en una casa de los barrios periféricos ubicados sobre laderas (se observa el rastro dejado por la roca en primer plano) (imagen de arriba) y del derrumbamiento de un barranco que amenaza a las casas y sus ocupantes tanto en la cima como en la base de la pendiente (imagen de abajo) (imágenes de D. Barrell y G. Hancox, GNS Science).



antigüedad de alrededor de entre diez y doce millones de años (Forsyth et al., 2008) y constituyen una masa rocosa en forma de bloques de composición variada (que incluye rocas duras y blandas) de la que, cada cierto tiempo, se desprenden uno o varios bloques de roca que ruedan cuesta abajo hasta acumularse en forma de derrubio en la base de las laderas (Hancox et al., 2011). Muchas de las laderas naturales que rodean el puerto de Lyttelton, siguen teniendo una inclinación relativamente pronunciada y forman acantilados costeros prácticamente en ángulo recto. Son empinados, jóvenes y prácticamente verticales (de aproximadamente 75°-85°) con una altura de entre quince y treinta metros en muchos puntos. Además, se han abierto canteras en diversos puntos de la zona. En la actualidad, se han construido viviendas

tanto en los antiguos suelos de las canteras como en la cima de los acantilados.

Al menos cien rocas de gran tamaño lanzadas por el terremoto del 22 de febrero acabaron impactando sobre viviendas y se produjeron derrumbamientos de considerable importancia en los acantilados (Figura 11). Por todo ello, se señalaron mediante carteles de color rojo cerca de 450 viviendas residenciales de los barrios periféricos de las laderas. Estos carteles indicaban que se consideraba demasiado peligroso vivir en ellas. El 13 de junio de 2011, se produjeron más desprendimientos en los acantilados y más rocas de gran tamaño rodaron por las laderas hasta golpear varias viviendas. Actualmente, se está llevando a cabo una evaluación del riesgo a fin de determinar si el peligro para los ocupantes de las casas que fueron distinguidas con los carteles de color rojo es aceptable o inaceptable de acuerdo con el modelo probabilístico de movimientos sísmicos. La evaluación cuantitativa determinará si ya es seguro volver a ocupar las viviendas, si no podrán ocuparse nunca o si es posible volver a vivir en ellas tras encontrar una solución rentable a los desprendimientos que se producen en las laderas.

Daños a edificios e infraestructuras

Edificios residenciales

La mayoría de edificios residenciales de la región de Christchurch tienen un solo piso, una media de 150 m² y están contruidos a partir de un armazón de madera ligera sobre losas de hormigón o cimientos de pilotes de acuerdo con el estándar NZS 3604 (publicado por primera vez en 1978). Los materiales más habituales para las cubiertas son metales ligeros, arcilla o cemento y tejas. También se utilizan tablas de madera, estuco de yeso o ladrillos sin reforzar para el revestimiento exterior. El valor medio de una casa en Christchurch, incluido el terreno, es de aproximadamente 300.000 NZD².

Alrededor de treinta mil casas quedaron totalmente inhabitables tras la serie sísmica (tres cuartas partes de ellas en el seísmo de febrero) debido principalmente a la deformación estructural producida por la licuefacción. En ambos casos los daños producidos por el seísmo afectaron a áreas muy amplias (cerca de 150.000 casas en septiembre de 2010 y 170.000 en febrero de 2011),



aunque la gravedad de dichos daños fue por lo general reducida, ya que el coste medio de las reparaciones estuvo comprendido entre los 5.000 y 60.000 NZD. La excesiva severidad de los daños por licuefacción, la vulnerabilidad de los cimientos de las estructuras en algunos barrios exteriores y la alta probabilidad de que los movimientos del terreno superen los umbrales de activación de la licuefacción previstos en la vida útil de las viviendas reconstruidas en dichos barrios, han llevado a que se tome la decisión de evacuar algunos de estos barrios de la zona este de Christchurch además de otras áreas reducidas. El número total de viviendas ubicadas dentro de esta «zona roja» asciende a cerca de seis mil, aunque aún no ha finalizado el proceso de evaluación que determinará si es o no rentable recuperar el estado del terreno y volver a construir en él en zonas más alejadas.

Los daños estructurales producidos por el sismo en las viviendas fueron limitados, aunque los daños no estructurales afectaron a muchas casas. El derrumbamiento de chimeneas y cercos de ladrillo y la aparición de grietas en placas de yeso fueron comunes en todos los sismos de la serie sísmica de Canterbury. Los daños materiales han ido superponiéndose en sucesivos terremotos, cuya aceleración máxima el movimiento del terreno ha superado 0,2 g.

Edificios comerciales

Hormigón y mampostería reforzada

Dos edificios de oficinas de hormigón reforzado (uno de ellos diseñado y construido a principios de los años sesenta y el otro, a mediados de los años ochenta) se derrumbaron en el terremoto de febrero causando más de dos tercios de las 181 víctimas mortales. Por otro lado, la mayoría de edificios modernos respondieron bien ante el sismo, incluso con cargas sísmicas elevadas (movimientos con un periodo de retorno de cerca de dos mil quinientos años o más). Las distintas respuestas de unos edificios y otros pueden atribuirse al tipo de materiales, año de construcción y diseño estructural, así como a las diferencias relacionadas con las condiciones del suelo y el nivel de vibración experimentado (la aceleración máxima del suelo registrada en el distrito CBD varió entre 0,36 g y 0,72 g) en distintas partes de la ciudad.

Asimismo, en el distrito CBD se utilizaban distintos tipos de cimentación, desde ci-



Apuntamiento de edificio tras el terremoto de diciembre de 2010 en Christchurch

mentaciones superficiales a cimentaciones profundas con pilotes de longitud idéntica o variable y, en algunos casos, se utilizaba una combinación de ambos sistemas. Se produjeron daños en el hormigón y en la mampostería reforzada tanto en edificios antiguos como modernos, aunque fueron más habituales en edificios construidos antes de 1985 aproximadamente, época en la que empezaron a utilizarse en Nueva Zelanda sistemas de diseño resistente a las cargas.

Edificios de mampostería no reforzada (EMNR)

Fueron cientos los edificios de mampostería no reforzada (EMNR) que sufrieron graves daños o se derrumbaron por completo durante el terremoto del 22 de febrero. Aproximadamente, entre dos y tres veces más que durante el terremoto del 4 de septiembre. Puede que el número de vícti-

² 1 EUR = 1,54 NZD;
1 USD = 1,25 NZD
a julio 2012





Vista panorámica de las ruinas de la Catedral Anglicana en marzo de 2012 en Christchurch

mas mortales en los EMNR fuera menor porque a partir de septiembre se cerraron o acordonaron varios de estos edificios. Y es probable que la mayoría de los EMNR que habían sido modernizados de acuerdo con los principios de diseño antisísmico (EMNR reformados) con anterioridad a los seísmos del periodo 2010-2012 experimentara movimientos del terreno muy por encima de sus parámetros de diseño y, en algunos casos, por encima de los máximos niveles sísmicos contemplados. Por ello, respondieron de formas muy diferentes: el setenta por ciento fue acordonado para evitar que nadie entrara y solo se permitía el acceso en el nueve por ciento que se consideró seguro. En muchos casos, los daños producidos anteriormente en el terremoto de septiembre y en sus numerosas réplicas, influyeron en el comportamiento de los edificios durante el seísmo de febrero. Sin embargo, a pesar de los derrumbes, los daños materiales en los EMNR que habían sido reformados fueron considerablemente inferiores a los ocurridos en los EMNR de zonas cercanas que no habían sido reformados. Los pocos edificios históricos que se habían sometido a renovaciones a fin de aumentar su resistencia antisísmica, respondieron bien ante los seísmos.

Componentes no estructurales

En el distrito CBD, los daños no estructurales causados por el terremoto de febrero fueron similares, en

muchos sentidos, a los observados tras el terremoto de septiembre. En casi todos los edificios de oficinas y comercios, las estanterías se cayeron, las lámparas de techo y las tuberías de los sistemas contra incendios sufrieron daños, así como gran parte del mobiliario y su contenido. Especialmente destacables fueron la inesperada gravedad de los daños y el derrumbamiento de las escaleras en edificios de varias plantas. Una lección importante que podemos extraer de la serie sísmica de Canterbury es la importancia de la eficacia no estructural de los edificios comerciales. Así, si bien la respuesta de los edificios comerciales ante los terremotos ha sido buena desde el punto de vista estructural, los daños han tenido consecuencias socioeconómicas para la población.

Infraestructura

El terremoto de Christchurch produjo graves daños en infraestructuras de primera necesidad, como son la red de agua potable, la red de aguas residuales, el sistema de alcantarillado, la red eléctrica, las calles y las carreteras. Los daños fueron aún mayores que los producidos durante el terremoto de Darfield, el más fuerte, pero más lejano. Los daños debieron, principalmente, a la licuefacción. El impacto sobre la red eléctrica en febrero de 2011 fue aproximadamente diez veces superior al experimentado durante el terremoto de septiembre de 2010 en términos de interrupción del servicio y daños materiales en las



instalaciones. Asimismo, los edificios administrativos de la red eléctrica sufrieron graves daños en febrero. Los principales sistemas de cableado subterráneo que abastecían áreas de gran tamaño en la zona este de Christchurch fallaron y más de la mitad de los principales sufrieron daños en numerosos puntos a causa del movimiento del terreno producido por la licuefacción.

Puentes, carreteras y vías férreas

La mayoría de puentes en la zona de Christchurch están constituidos por arcos cortos de configuración regular y, en algunos casos, formados por una sola pieza o cuentan con buenas sujeciones. En general, respondieron bien ante los terremotos. En la mayoría de los casos, los únicos problemas se debieron a asentamientos y desplazamientos laterales experimentados en zonas cercanas y a la consiguiente rotación de los contrafuertes. La red de carreteras, especialmente en zonas donde se produjo licuefacción, quedó muy dañada, aunque su reparación es relativamente sencilla. La mayor parte de la red nacional de carreteras se extiende fuera de las áreas más propensas a sufrir licuefacción, por lo que, aparte de desplazamientos de algunos metros sin demasiada importancia a lo largo de la línea superficial de la Falla de Greendale, los daños fueron escasos. La red ferroviaria sufrió daños durante el terremoto de Darfield del 4 de septiembre debido a la deformación super-

ficial sufrida en aquellos tramos que cruzaban la traza nororiental de la Falla de Greendale y también a causa del desplazamiento lateral en el área cercana a un puente ferroviario al norte de Christchurch. Las reparaciones en ambas ubicaciones se prolongaron durante varios días. Ningún otro terremoto de la serie sísmica causó más desperfectos en este ámbito.

Consecuencias e implicaciones socioeconómicas

El terremoto del 4 de septiembre de 2010 afectó principalmente a la zona rural situada al oeste de Christchurch, a los barrios periféricos orientales más susceptibles a la licuefacción y a zonas relativamente pequeñas del distrito CBD, donde los daños a los EMNR fueron más graves. Por el contrario, el terremoto del 22 de febrero de 2011 y, en menor grado, el del 13 de junio de 2011 afectaron gravemente a la ciudad, especialmente a los barrios periféricos orientales (de nuevo), el distrito CBD y los barrios periféricos ubicados sobre laderas situadas al sur de Christchurch.

En el distrito CBD, se calcula que el número de edificios de hormigón o mampostería no reforzada que sufrieron daños en el terremoto, de tal gravedad que era necesario demolerlos, ascendió a novecientos (las labores de demolición debían llevarse a cabo antes de que pudiera iniciarse la reconstrucción). La mayor parte de estos edificios estaban cubiertos por seguros de acuerdo con las normas internacionales, por lo que es probable que haya capital disponible para llevar a cabo la reconstrucción. Sin embargo, esto no significa que este capital vaya a permanecer necesariamente en Canterbury, puesto que varios informes indican que algunos propietarios pueden estar interesados en reinvertir en otros lugares de Nueva Zelanda. Es más, es posible que los seguros por interrupción de la actividad comercial no sean suficientes para cubrir lo que se espera que sea un periodo prolongado, antes de que puedan acometerse las labores de reconstrucción.

En el distrito CBD había cerca de seis mil empresas o establecimientos comerciales que daban empleo a más de cincuenta mil personas (es decir, un 25% de las personas que trabajaban en la ciudad). De esos cincuenta mil empleados, el 45%

Si bien la respuesta de los edificios comerciales ante los terremotos ha sido buena desde el punto de vista estructural, los daños han tenido consecuencias socioeconómicas para la población

Es posible que los seguros por interrupción de la actividad comercial no sean suficientes para cubrir lo que se espera que sea un periodo prolongado

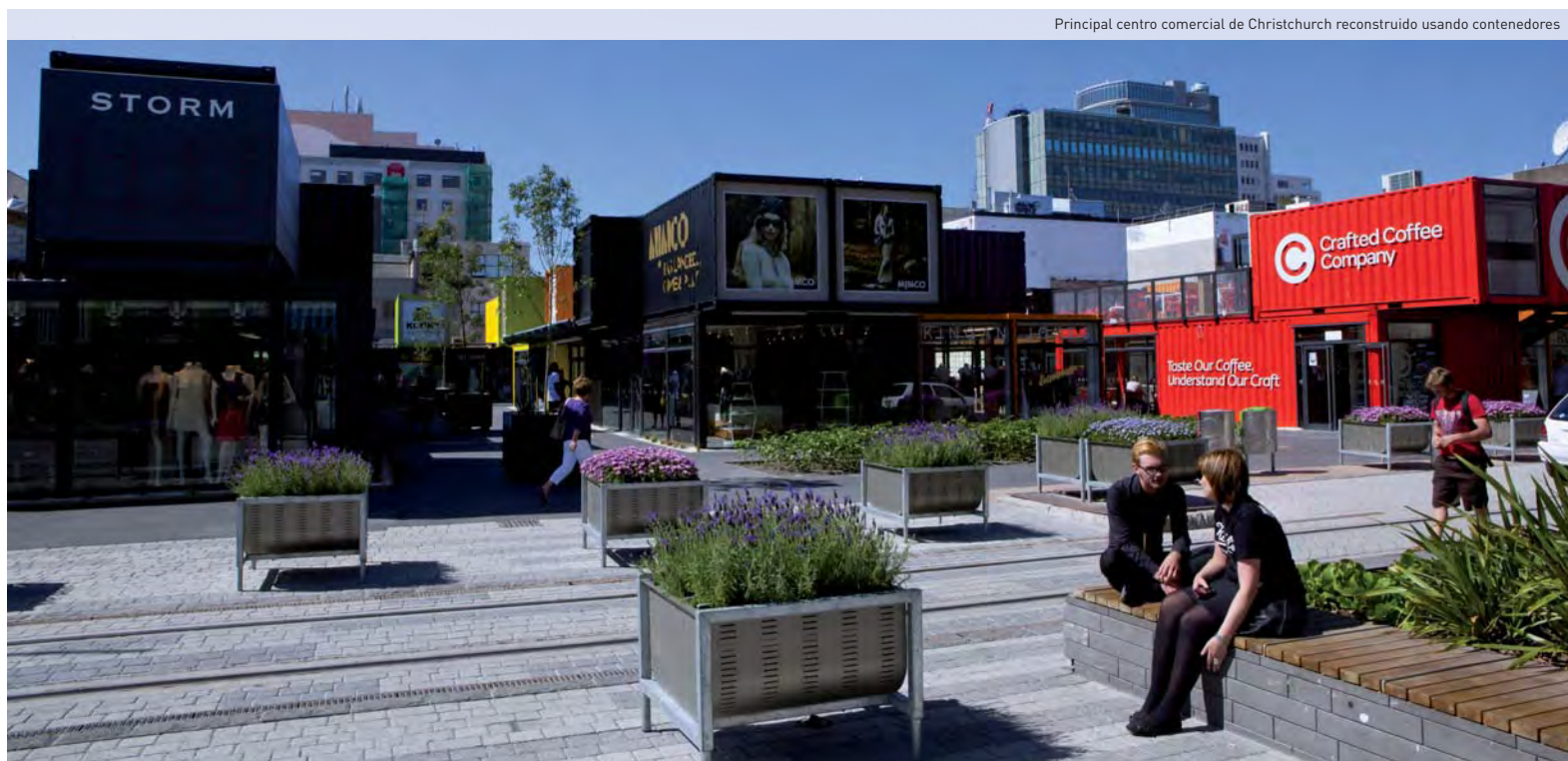
trabajaba para la Administración o el sistema sanitario o bien prestaba servicios profesionales. Es probable que ellos conserven su empleo, bien en Christchurch o en otro sitio. Otros trabajadores se dedican a diversos ámbitos, como por ejemplo el turismo, la hostelería, la industria, la construcción, la venta al por mayor o al por menor, el transporte, las comunicaciones, las finanzas, los seguros y el ocio. A muchos de estos sectores les ha ido bien, ya que el papel de Christchurch como núcleo de la economía agrícola y regional de Canterbury apenas se ha visto afectado. Sin embargo, aunque es posible que el sector turístico, en concreto, se enfrente a un creciente desempleo, otros sectores como el de la construcción tienen previsto ampliar considerablemente su plantilla en cuanto comiencen las labores de reconstrucción.

A diferencia de muchas áreas que han sufrido desastres naturales, la interrupción de la actividad económica por los terremotos no ha tenido repercusiones significativas en términos totales y las previsiones oficiales en cuanto a las perspectivas económicas de Canterbury son positivas. La actividad económica de Canterbury, según el Banco Nacional, aumentó un 1,9% durante el segundo trimestre de 2011, tras una contracción del 2,5% en el primer trimestre. Las previsiones oficiales de mayo de 2011 para el año siguiente anunciaban un crecimiento económico generali-

zado en toda Nueva Zelanda del cuatro por ciento y un crecimiento de cerca del dos por ciento de la actividad de reconstrucción. En términos generales, se estima que el PIB nacional crecerá en torno al ocho por ciento en los próximos siete años gracias a las labores de reconstrucción.

El hecho de que la serie sísmica se prolongara durante un plazo de tiempo considerable ha generado preocupación sobre la seguridad a largo plazo y cabe la posibilidad de que la aversión generalizada al riesgo pueda derivar en expectativas poco realistas en cuanto al comportamiento de los edificios en situaciones extremas. Debido a la percepción del riesgo por parte de la población, es posible que las disposiciones del código de construcción que se limitan a proteger la seguridad de las personas no sean suficientes en el futuro en las grandes ciudades, puesto que lo aprendido en Christchurch en términos geotécnicos, de ingeniería estructural y de riesgo se está teniendo muy en cuenta en todo el país. La percepción del riesgo y el impacto del mismo sobre el turismo internacional, que representa el nueve por ciento del PIB de Nueva Zelanda, también son preocupantes.

Nueva Zelanda es un caso único en cuanto a su esquema de seguros de terremoto para viviendas. La Comisión de Terremotos (EQC) es un órgano público de Nueva Zelanda que ofrece seguro frente



Principal centro comercial de Christchurch reconstruido usando contenedores

a desastres naturales a los propietarios de inmuebles residenciales que cubren los daños al continente y contenido, así como a los terrenos donde se asienta la vivienda. En caso de producirse un desastre natural, la Comisión EQC paga o bien el coste de la reparación o bien el valor de la vivienda dañada, lo que sea menor (hasta un máximo de 100.000 NZD por el continente y 20.000 NZD por el contenido), y también repara o cubre los daños al terreno hasta el importe del valor previo al desastre. La EQC se hace cargo de los primeros 1.500 millones de NZD de pérdidas ocasionadas por un evento de gravedad, antes de que se activen los 2.500 millones de NZD de cobertura de reaseguro. Este primer riesgo, y cualquier responsabilidad en exceso de la cobertura del reaseguro, se financian a través del *National Disaster Fund* (Fondo Nacional de Desastres Naturales) del Gobierno (gestionado también por la EQC). Antes de los terremotos de Canterbury, este fondo disponía de cerca de 6.100 millones de NZD, pero se estima que se agotará completamente a consecuencia de los eventos de Canterbury. Si el reaseguro de la EQC y el *National Disaster Fund* no son suficientes para cubrir los costes totales de los daños causados por un evento, cualquier gasto residual queda, implícitamente, garantizado y cubierto por el Gobierno. De hecho, es probable que tenga que recurrirse a la garantía del Gobierno como consecuencia de los eventos de Canterbury.

Las labores de comunicación tras el terremoto de febrero fueron una de las principales prioridades de los funcionarios encargados de tranquilizar a la población e informarla de que se habían tomado medidas eficaces para reparar las infraestructuras y proteger la vida de los ciudadanos. Las acciones llevadas a cabo por el Gobierno han sido cruciales para transmitir seguridad y ayudar en la reconstrucción de Christchurch y sus alrededores. Además de los fondos facilitados por la EQC, el Gobierno constituyó el Fondo de Recuperación tras el Terremoto de Canterbury (CERF), que contaba con un presupuesto de 5.500 millones de NZD. Teniendo también en cuenta las estimaciones revisadas recientemente, se calcula que la suma total invertida por la Administración con motivo del terremoto derivada de las obligaciones asumidas por la EQC asciende a cerca de 12.900 millones de NZD. Por otro lado, el Gobierno ha creado un organismo especializado, la Autoridad de Recuperación del Terremoto de Canterbury, para que se encargue de coordinar todos los aspectos relativos a las medidas de recuperación.

Conclusiones

La serie sísmica de Canterbury durante el periodo 2010-2011 se considera el desastre natural más grave sufrido por Nueva Zelanda en sus casi 170 años de historia europea, con unos costes económicos cercanos al ocho por ciento del PIB anual, es decir, prácticamente iguales a la aportación del sector turístico a Nueva Zelanda en términos anuales. El impacto per cápita ha sido entre dos y cuatro veces superior al balance del Huracán Katrina en la economía de los Estados Unidos.

En su mayoría, tanto los daños como la repercusión socioeconómica experimentados por la región, son los esperados de un evento muy poco frecuente y que se calcula que afecte a Christchurch una vez cada varios miles de años por término medio. El carácter continuo de la serie sísmica ha creado un desastre natural más parecido a una sucesión prolongada de erupciones volcánicas que a los patrones sísmicos habituales de un único seísmo principal (que es el que causa la mayor parte de los daños) seguido de una serie de réplicas y la probabilidad de que vuelva a producirse otro terremoto de magnitudes similares durante el próximo año es cercana al diez por ciento.

El prolongado periodo de actividad sísmica y la continua, aunque moderada, probabilidad de que se produzcan más terremotos están dificultando la adquisición de seguros de terremoto que cubran las labores de reconstrucción, puesto que tanto las aseguradoras como las reaseguradoras han asumido muchas pérdidas por esta serie tan rara, probabilísticamente hablando. La interrelación entre la ciencia, la ingeniería, las necesidades y expectativas sociales, las empresas, los seguros, el reaseguro y el Gobierno es compleja por la superposición de las obligaciones económicas, sociales y técnicas en la fase de recuperación post-catástrofe que evoluciona rápidamente.

Referencias

Beavan, J., Fielding, E., Motagh, M., Samsonov, S., Donnelly, N. (2011). *Fault location and slip distribution of 22 February 2011 Mw 6.3 Christchurch, New Zealand, earthquake from geodetic data. Seismological Research Letters: submitted June 2011.*

A día de hoy, el nivel de peligrosidad sísmica en Canterbury es superior a lo esperable a largo plazo y es probable que se mantenga así durante varias décadas

Durante la serie sísmica que se registró en el periodo 2010-2012, la ciudad de Christchurch experimentó distintos rangos de movimiento del terreno que, en ciertas ocasiones, sobrepasaron los niveles de diseño

Beavan, J., Tregoning, P., Bevis, M., Kato, T., and Meertens, C. (2002). *Motion and rigidity of the Pacific Plate and implications for plate boundary deformation*, J. Geophys. Res., 107(B10): doi: 10.1029/2001JB000282.

Beavan, R.J., Samsonov, S., Motagh, M., Wallace, L.M., Ellis, S.M., Palmer N.G. (2010). *The Darfield (Canterbury) earthquake: geodetic observations and preliminary source model*. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 43(4): 228-235.

Berryman, K.R., Beanland, S., Cooper, A.F., Cutten, H.N., Norris, R.J., and Wood, P.R. (1992). *The Alpine Fault, New Zealand, variation in Quaternary structural style and geomorphic express*, *Annales Tectonicae*, 6: 126-163.

Cousins, W.J., McVerry, G.H. (2010). *Overview of strong-motion data from the Darfield Earthquake*. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 43(4): 222-227.

Cox, S., and Sutherland, R. (2007). *Regional geological framework of South Island, New Zealand, and its significance for understanding the active plate boundary*, in: *A Continental Plate Boundary: Tectonics at South Island, New Zealand*, AGU Geophysical monograph series 175: 19-46.

Cubrinovski and Taylor, 2011. *Liquefaction Map - Drive-through Reconnaissance*, University of Canterbury NZ. www.nzsee.org.nz

EERI, 2011. M 6.3 Christchurch, New Zealand, Earthquake of February 22, 2011. *EERI Special Earthquake Report - May 2011*.

Forsyth, P., Barrell, D., and Jongens, R. (compilers) (2008). *Geological Hazards*. Pp. 53-56 in: *Geology of the Christchurch Area - Scale 1:250,000*. Institute of Geological & Nuclear Sciences 1:250,000 Geological Map 16.

Fry, B., and Gerstenberger, M. (2011). *Large apparent stresses from the Canterbury earthquakes of 2010 and 2011*. *Seismological Research Letters: submitted June 2011*.

Fry, B., Benites, R., Reyners, M., Holden, C., Kaiser, A., Bannister, S., Gerstenberger, M., Williams, C., Ristau, J., Beavan, J. (2011a). *Extremely strong shaking in the New Zealand*



earthquakes of 2010 and 2011. *Eos Transactions, American Geophysical Union*, submitted.

Gerstenberger, M. C., McVerry, G., Rhoades, D. A., Stirling, M. W., Berryman, K., Webb, T. (2011). *Update of the Z-factor for Christchurch considering earthquake clustering following the Darfield earthquake*, *GNS Science Report 2011/29* 19 p.

Gerstenberger, M., Wiemer, S., Jones, L.M., and Reasenber, P.A. (2005). *Real-time forecasts of tomorrow's earthquakes in California*, *Nature* 435: 328-331.

Landslides caused by the 22 february 2011 Christchurch earthquake and management of landslide risk in the immediate aftermath. Dellow, G., Yetton, M., Massey, C., Archibald, G., Barrell, D. J. A., Bell, D., Bruce, Z., Campbell, A., Davies, T., De Pascale, G., Easton, M., Forsyth, P. J., Gibbons, C., Glassey, P., Grant, H., Green, R., Hancox, G., Jongens, R., Kingsbury, P., Kupec, J., Macfarlane, D., Mcdowell, B., Mckelvey, B., Mccahon, I., Mcpherson, I., Molloy, J., Muirson, J., O'halloran, M., Perrin, N., Price, C., Read, S., Traylen, N., Van Dissen, R., Villeneuve, M., Walsh, I.



Christchurch y la península de Banks vista desde la Estación Espacial Internacional (ISS)

Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering [Bull. New Zealand Soc. Earthq. Eng.]. Vol. 44, no. 4, pp. 227-238. Oct 2011.

Holden, C., Beavan, J., Fry, B., Reyners, M., Ristau, J., Van Dissen, R., Villamor, P., Quigley, M. (2011). *Preliminary source model of the Mw 7.1 Darfield earthquake from geological, geodetic and seismic data. In: Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering, 14 – 16 April, Auckland, New Zealand, paper no. 164.*

McVerry, G.H., Zhao, J.X., Abrahamson, N.A., Somerville, P.G. (2006). *New Zealand acceleration response spectrum attenuation relations for crustal and subduction zone earthquakes. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering 39(1): 1-58.*

Norris, R.J., and Cooper, A.F. (2001). *Late Quaternary slip rates and slip partitioning on the Alpine Fault, New Zealand, J. Structural Geol., 23: 507-520.*
Pettinga, J., Chamberlain, C., Yetton, M., Van Dissen, R., Downes, G. (1998). *Earthquake Hazard and Risk Assessment Study, Stage 1 (Part A) Earthquake Source Identification and Characterisation. Report prepared for Canterbury Regional Council, Rivers and Coastal Resources, and Hazards Section by. CRC Publication Number U98/10 - March 1998.*

Pettinga, J.R., Yetton, M.D., Van Dissen, R.J., Downes, G.L. (2001). *Earthquake source identification and characterisation for the Canterbury region, South Island, New Zealand. Bull. of the N.Z. Soc. for Earthquake Engineering, 34(4): 282-317.*

M. Quigley, R. Van Dissen, N. Litchfield, P. Villamor, B. Duffy, D. Barrell, K. Furlong, T. Stahl, E. Bilderback and D. Noble, 2012, *Surface rupture during the 2010 Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake: Implications for fault rupture dynamics and seismic-hazard analysis Geology v. 40 no. 1 p. 55-58 ; doi: 10.1130/G32528.1*

Quigley, M., Villamor, P., Furlong, K., Beavan, J., Van Dissen, R., Litchfield, N., Stahl, T., Duffy, B., Bilderback, E., Noble, D., Barrell, D., Jongens, R., Cox, S. (2010). *Previously unknown fault shakes New Zealand's South Island. Eos, Transactions, American Geophysical Union 91(49): 469-471.*

Reyners, M. (2011). *Lessons from the destructive Mw 6.3 Christchurch, New Zealand, Earthquake. Seismological Research Letters 82(3): 371-372.*

Rhoades, D.A., and Evison, F.F. (2004). Long-range earthquake forecasting with every earthquake a precursor according to scale. *Pure and applied geophysics, 161(1): 47-72.*

Stirling, M.W., McVerry, G.H., and Berryman, K.R. (2002). *A new seismic hazard model for New Zealand. Bulletin of the Seismological Society of America 92: 1878-1903.*

Wallace, L.M.; Beavan, R.J.; McCaffrey, R.; Berryman, K.R.; Denys, P. 2007 *Balancing the plate motion budget in the South Island, New Zealand using GPS, geological and seismological data. Geophysical journal international, 168(1): 332-352; doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03183.x*

Webb, T.H. (compiler); Bannister, S.; Beavan, J.; Berryman, K.; Brackley, H.; Fry, B.; Gerstenberger, M.; Holden, C.; Kaiser, A.; McVerry, G.; McSaveney, E.; Pettinga, J.; Reyners, M.; Rhoades, D.; Somerville, P.; Stirling, M.; Van Dissen, R.; Villamor, P.; Wallace, L. and Zhao, J., 2011. *The Canterbury Earthquake Sequence and Implications for Seismic Design Levels, GNS Science Consultancy Report 2011/183, 88 p.*

