

CAPÍTULO 5

Intensidades sísmicas

Maximiliano Astroza¹**Sergio Ruiz^{2,3}****Rodrigo Astroza^{4,5}****Jesarella Molina⁶***1. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile**2. Departamento de Geología, Universidad de Chile**3. Departamento des Géosciences, Ecole Normale Supérieure, París, Francia**4. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes**5. Department of Structural Engineering, University of California-San Diego, La Jolla, EE.UU.**6. Ingeniero Civil, Universidad de Chile*

1. Introducción

La intensidad sísmica es una medida no instrumental de los efectos que produce el movimiento del suelo en las personas, en los objetos, en las construcciones y en la naturaleza. Desde la segunda mitad del siglo XIX se han usado diferentes escalas, en las cuales los grados de intensidad se determinan de acuerdo con una descripción de los efectos observados en los cuatro referentes mencionados.

Hasta la primera mitad del siglo XX, la intensidad sísmica era la única medida de campo cercano de los efectos de un terremoto debido a la falta de redes de instrumentos. Esta situación no ha cambiado mayormente en los países en desarrollo ubicados en regiones de alta sismicidad como los latinoamericanos de la costa oeste de Sudamérica: Chile, Perú, Ecuador y Colombia.

Por lo anterior, la intensidad sísmica es una de las medidas que se dispone de los efectos de los terremotos históricos que han ocurrido en Chile desde comienzos del siglo XX, gracias al trabajo de recopilación realizado por Montessus de Ballore y a los realizados por otros sis-

mólogos e ingenieros desde la fundación del Servicio Sismológico de la Universidad de Chile en 1908.

Para los terremotos históricos, la información disponible corresponde a una descripción del fenómeno, destacando los alzamientos y hundimientos del terreno y los daños observados, lo que ha permitido delimitar el área de daño del evento.

Teniendo en cuenta esta realidad histórica y la disponibilidad de recursos técnicos, sigue siendo necesario determinar la intensidad sísmica de los terremotos que ocurran en el país con la finalidad de ubicarlos dentro del marco histórico, y así entender y cuantificar mejor la amenaza sísmica y sus consecuencias, considerando la sismicidad y las características de las fuentes sismogénicas de la subducción sudamericana.

Con este propósito, en este capítulo se estima y analiza la intensidad sísmica en 108 localidades ubicadas dentro del área de daños del terremoto del 27 de febrero del 2010 (Mw=8.8). Además se estudia la intensidad sísmica en 125 sectores ubicados en las 34 comunas que forman el Gran Santiago, lo que permite comparar los efectos del terremoto del 27 de febrero con los del terremoto del 3 de marzo de 1985 (Ms=7.8) en la capital del país.

El análisis de las intensidades sísmicas estimadas en 108 localidades, todas ellas con un grado comprendido entre los V y IX grados en la escala MSK- 64 (Medvedev and Sponheuer, 1969), permite comprobar que tanto su magnitud como su distribución están definidas por la forma en que se desarrolla el proceso de ruptura del terremoto, siendo determinante la ubicación de las zonas del contacto entre la placa de Nazca y Sudamericana donde se producen los mayores deslizamientos durante este proceso (asperezas del terremoto). Además, nuevamente queda en evidencia el efecto de las condiciones locales del lugar, las cuales quedan determinadas por el origen de los depósitos (geología superficial), por su estratigrafía y por la profundidad del nivel freático. Estas condiciones varían de una localidad a otra, y en numerosas ocasiones cambian dentro de una misma localidad, como ocurre en las ciudades de Santiago, Talca, Parral, Constitución y Concepción, entre otras. Los tres factores destacados son fundamentales de identificar para entender la distribución de los efectos del movimiento del suelo, especialmente lo relacionado con el daño observado en un mismo tipo de construcción cuando se cambia de lugar durante la inspección en terreno.

Las intensidades sísmicas que se entregan en este capítulo permitirán ubicar el terremoto del 27 de febrero de 2010 en el contexto histórico de los terremotos que han afectado la zona Central de Chile y para los cuales se cuenta con información relacionada con sus parámetros focales, su área de daño y las intensidades sísmicas.

2. Intensidades sísmicas en la zona de daño del terremoto

La zona de daño de un terremoto corresponde a la zona donde la intensidad es mayor o igual a un grado V en una escala de XII grados, como son las escalas de Mercalli Modificada, MSK-64 y Europea (Grunthal, 1998). En el caso del terremoto del 27 de febrero de 2010, el daño se observó entre el paralelo 33.5° y 38° de latitud sur, lo que representa una zona con una longitud de 500 km, la que se extiende desde la V Región por el norte hasta la IX Región por el sur, donde habita el 80% de la población del país (INE, 2002). En esta zona se encuentran los tres principales centros urbanos de Chile, como son las ciudades de Valparaíso-Viña del Mar, Santiago y Concepción. Esta situación implicó que el terremoto afectara un parque de construcciones de muy variadas características, como viviendas de adobe de los sectores rurales

y los edificios altos de hormigón armado de más de 20 pisos construidos con posterioridad al terremoto del 3 de marzo de 1985.

La intensidad sísmica se determina con el método propuesto por Monge y Astroza (1989), el cual se ha aplicado a los terremotos chilenos ocurridos desde la década de los años 70 del siglo XX y en los estudios de los efectos de los terremotos históricos de Valparaíso de 1906 (Astroza, 2007, Saragoni y Carvajal, 1991), Talca de 1928 (Sanhueza, 2002), Chillan 1939 (Moya, 2002), Santiago de 1945 (Sandoval, 2004), Las Melosas de 1958 (Sepúlveda et al. 2008) y La Ligua de 1965 (Norambuena, 2006). El método se basa en la distribución del daño observado en una muestra de viviendas de uno y dos pisos de un mismo tipo de construcción o clase de vulnerabilidad recomendada por la escala MSK-64, modificada por Karnik et al. (1984), la cual se detalla en la Tabla 1. Los grados de daño se establecen utilizando la escala de daños detallada en la Tabla 2, la cual es una adaptación de la escala de daño usada por las escalas de intensidad MSK-64 y Europea a las características de las viviendas chilenas.

TABLA 1. Distribución del daño en función del grado de intensidad sísmica para cada clase de vulnerabilidad (Modificada de Karnik et al., 1984).

Grado de Intensidad	Clase A	Clase B	Clase C
V	5% Grado 1 95% Grado 0	100% Grado 0	100% Grado 0
VI	5% Grado 2 50% Grado 1 45% Grado 0	5% Grado 1 95% Grado 0	100% Grado 0
VII	5% Grado 4 50% Grado 3 35% Grado 2 10% Grado 1	50% Grado 2 35% Grado 1 15% Grado 0	50% Grado 1 50% Grado 0
VIII	5% Grado 5 50% Grado 4 35% Grado 3 10% Grado 2	5% Grado 4 50% Grado 3 35% Grado 2 10% Grado 1	5% Grado 3 50% Grado 2 35% Grado 1 10% Grado 0
IX	50% Grado 5 35% Grado 4 15% Grado 3	5% Grado 5 50% Grado 4 35% Grado 3 10% Grado 2	5% Grado 4 50% Grado 3 35% Grado 2 10% Grado 1
X	75% Grado 5 25% Grado 4	50% Grado 5 35% Grado 4 15% Grado 3	5% Grado 5 50% Grado 4 35% Grado 3 10% Grado 2
XI	100% Grado 5	75% Grado 5 25% Grado 4	50% Grado 5 50% Grado 4

TABLA 2. Escala de daños (Monge y Astroza, 1989)

Grado de daño	Nivel de daño	Descripción
G0	Sin daño	No hay daño de ningún tipo
G1	Daños Leves	Grietas finas en estucos. Caída de pequeños trozos de estuco
G2	Daños Moderados	Grietas horizontales en antetechos, tímpanos, chimeneas. Grietas pequeñas en los muros bajo el nivel del cielo. Grietas verticales en encuentro de muros. Caída de grandes trozos de estuco. Corrimientos de tejas. Grietas en las chimeneas e incluso derrumbes parciales en las mismas.
G3	Daños Severos	Grietas diagonales largas y profundas en los muros bajo el nivel del cielo. Grietas verticales en encuentro de muros con separación, indicando desaplomo. Caída de antetechos, tímpanos o chimeneas. Grietas en tabiques divisorios.
G4	Destrucción Parcial	Caída de un muro o parte de un muro bajo el nivel del cielo. Tabiques divisorios y rellenos de la estructura se derrumban.
G5	Colapso	Caída de más de un muro. Destrucción total del edificio.

Para el caso del terremoto del 27 de febrero, las muestras seleccionadas fueron viviendas del tipo unifamiliar de uno y dos pisos de adobe (*Clase A*) y de albañilería confinada de ladrillos cerámicos (*Clase C*), las cuales corresponden a los tipos de construcción que más abundan en la zona afectada por el terremoto. Como prueba de esto último, de un total de 443.332 viviendas ubicadas en las regiones más afectadas por el terremoto, VI Región y VII Región, un 51.8% corresponde a viviendas de albañilería de ladrillo y un 19.4% a viviendas de adobe. En varias comunas de estas dos regiones las viviendas de adobe superan el 25%, como se muestra en la Figura 1.

La determinación del grado de daño de cada vivienda se hizo por inspección visual en un sector vecino a la Plaza de Armas de cada localidad en una muestra cuyo tamaño debe ser como mínimo 20 viviendas (Monge y Astroza, 1989). Teniendo en cuenta lo anterior, el valor de la intensidad sísmica representa las condiciones locales del sector revisado y el comportamiento de estructuras con las características de las viviendas de la muestra.

El tipo de daño observado en las viviendas de adobe corresponde al mostrado en la Figura 2. El grado del daño asignado en el pie de figura está de acuerdo con la descripción de la Tabla 2.

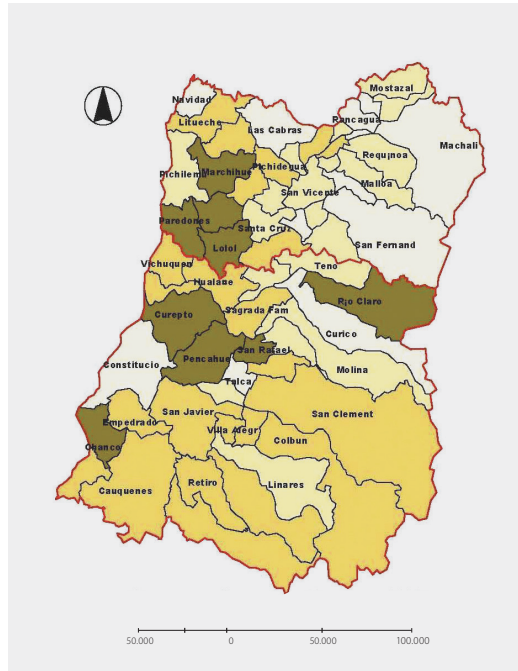


Figura 1. Porcentaje viviendas de adobe sobre el total comunal en la VI y VII Regiones. (BID, 2006)



Figura 2. Daños observados en viviendas de adobe. **a)** Desprendimiento de estuco (G2), **b)** Grietas verticales en encuentro de muros (G2), **c)** Grietas diagonales en muro (G3), **d)** Colapso de más de un muro (G5).

Las intensidades sísmicas estimadas se indican en la Tabla 3 y también se muestran en la Figura 3 junto con el mapa de curvas isosistas, con la distribución de los deslizamientos desarrollados durante el proceso de ruptura del terremoto (Tong et al., (2011) y la ubicación del epicentro (SSN, 2010) y del centroide de la aspereza principal. Las intensidades sísmicas estimadas no representan los efectos del movimiento del suelo en los sectores donde se produjo el colapso del suelo de fundación producto de una licuación, asentamiento o deslizamiento. Tampoco representan las situaciones en que hubo efectos topográficos, como el caso observado en el sector de cerro O'Higgins en la ciudad de Constitución.

TABLA 3. Intensidades sísmicas estimadas en la zona de daño del terremoto (Astroza et al., 2010).

IMSK-64	Lugar
≥ VIII	Peralillo (1), Pumanque (2), Licanten (3), Curepto (4), Constitución (5), Talca (6), Cauquenes (7), Parral (8)
VII ½	Navidad (9), Doñihue (10), Coinco (11), Esperanza (12), Coltauco (13), Pichidegua (14), Población (15), Santa Cruz (16), Chépica (17), Lolol (18), Curicó (19), Gualleco (20), Batuco (21), Concepción (22)
VII	El Covento (23), San Enrique (24), La Boca (25), Matanza (26), Rengo (27), Litueche (28), Machali (29), La Estrella (30), Peumo (31), San Vicente de Tagua-Tagua (32), Las Pataguas (33), Teno (34), Rauco (35), Hualañe (36), Molina (37), Cumpeo (38), Penciahue (39), Bobadilla (40), Empedrado (41), Chanco (42), Retiro (43), Cobquecura (44), Quirihue (45), Ninhue (46), San Carlos (47), Quillon (48), Bulnes (49), Penco (50), Tome (51), Florida (52), Lota (53), Santiago (106).
VI ½	Pomare (54), Talagante (55), El Monte (56), Melipilla (57), San Pedro (58), Rapel (59), Rancagua (60), San José (61), Marchigue (62), San Fernando (63), Paredones (64), Nancagua (65), La Huerta (66), Pelarco (67), San Clemente (68), San Javier (69), Villa alegre (70), Linares (71), Longavi (72), Coelemu (73), San Nicolas (74), Chillán (75), Ñipas (76), Cabrero (77), Los Angeles (78), Angol (79).
VI	San Antonio (80), Codegua (81), Las Cabras (82), Requinoa (83), Chimbarongo (84), Romeral (85), Yervas Buenas (86), Trehuaco (87), San Ignacio (88), General Cruz (89), Pemuco (90), Monteaguala (91), Yumbel (92), Yungay (93), Arauco (94), La Laja (95), Curanilahue (96), Nacimiento (97), Lebu (98), Los Alamos (99), Tres Pinos (100), Valparaíso (107), Viña del Mar (108).
V	Renaico (101), Cañete (102), Los Sauces (103), Contulmo (104), Puren (105)

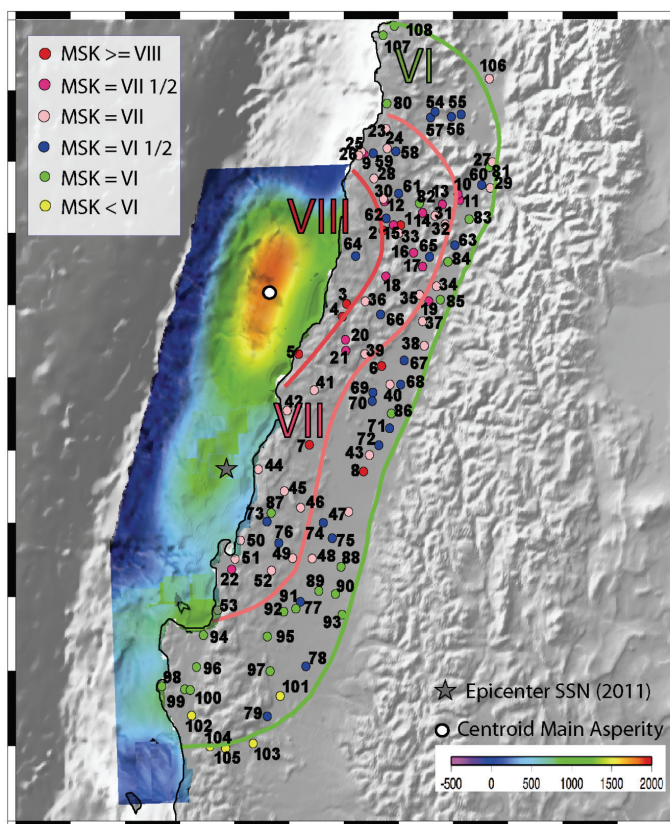


Figura 3. Intensidades sísmicas y mapa de curvas isosistas dentro de la zona de daño del terremoto del 27 de febrero de 2010. Los números romanos corresponden al valor de la intensidad sísmica en la escala MSK y los números arábigos identifican las localidades visitadas según la enumeración de la Tabla 3.

La Tabla 3 no incluye localidades ubicadas a lo largo de la costa de la zona de daño, entre Lolleo y Tirúa, debido a que en ellas resultaba muy difícil separar los daños causados por efecto del movimiento del suelo y del maremoto. Sin embargo, en un recorrido por el borde costero, entre Constitución y San Antonio, se pudo comprobar que los daños causados por el movimiento del suelo en algunos lugares fueron reducidos, ver Figura 4, y la intensidad sísmica fue menor que un grado VIII cuando el lugar se ubica sobre roca dura, suelo Tipo I según NCh433 (2011), en el cual históricamente se ha observado poco daño mientras no se presenten los efectos de un maremoto con las características del ocurrido el 27 de febrero de 2010.

Es importante destacar que los valores estimados en las ciudades de Santiago ($I_{MSK}=6.5$) y Concepción ($I_{MSK}=7.5$) corresponden a dos sectores antiguos, como son el sector nor-poniente de la comuna de Santiago y el sector comprendido entre las calles Manuel Rodríguez, Angol, Cruz y Rengo de la ciudad Concepción. Los valores de la intensidad sísmica en otros sectores de estas ciudades varían, lo que también se pudo observar en el terremoto del 3 de marzo de 1985 en la ciudad de Santiago (Astroza et al., 1989, Astroza y Monge, 1991a) y del 21 de mayo de 1960 en la ciudad de Concepción (Oppliger, 1968).



Figura 4. Daños en borde costero (A) Vivienda en Duao, (B) Cabañas en La Pesca, (C) Grupo de viviendas en Putu, (D) Vivienda en Iloca.

Isosistas del terremoto del 27 de febrero

Las curvas isosistas de la Figura 3 representan el valor de la intensidad sísmica sobre un suelo duro o denso, clasificado como II según la norma chilena de diseño sísmico de edificios (NCh433, 2011). Estas curvas se trazaron normalizando los valores estimados de las intensidades a un suelo Tipo II, para lo cual se corrigió el valor estimado de la intensidad sísmica teniendo en cuenta la variación que experimenta de acuerdo con la geología superficial del lugar (Astroza y Monge, 1991b).

Debido a la corrección destacada, el mapa de isosistas de la Figura 3 se independiza de los efectos de las condiciones locales del lugar y representa principalmente los efectos de la fuente sísmica, observándose que el daño en las viviendas con una estructura rígida estuvo controlado por la aspereza ubicada al norte del epicentro del terremoto del 27F, zona donde se produjo el mayor deslizamiento durante el proceso de ruptura (Tong et al., 2011) y la mayor liberación de ondas de alta frecuencia (Ruiz et al., 2012).

Este resultado confirma que la distribución de las intensidades sísmicas en los mega-terremotos de subducción del tipo “thrust” está relacionada con la ubicación de las “asperezas” asociadas al proceso de ruptura del evento y no con la ubicación del hipocentro. Esta característica de las isosistas también se observa en el terremoto del sur de Chile ocurrido el 22 de mayo de 1960 (Mw=9.5) (Astroza y Lazo, 2010).

De acuerdo con las isosistas de la Figura 3, se observa que el daño fue mayor hacia el norte del epicentro, lo que es consecuencia de la forma en que se desarrolló la ruptura en el contacto entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana (Ruiz et al., 2012). Esto significó que el mayor número de damnificados y de viviendas dañadas se produjera en las regiones VI y VII, como se muestra en los mapas de afectación de las Figuras 5, 6 y 7 (ONEMI, 2010), y que cinco de las siete localidades con una intensidad sísmica igual a VIII grados están en la VII Región.

Al comparar los mapas de la Figuras 5 y 6 con el mapa de la Figura 7, se observa que el número de damnificados fue menor en la VIII Región, lo que está directamente relacionado con que las intensidades sísmicas estimadas en varias localidades de la VIII Región fueran menores o iguales a VII grados, como se muestra en la Figura 3.

Por otro lado, con las distintas distribuciones de deslizamiento de la ruptura sísmica (Delouis et al., 2010; Lay et al., 2010; Tong et al., 2011; Lorito et al., 2011; Vigny et al., 2011; Pollitz et al., 2011; Pulido et al., 2011; Ruiz et al., 2012) es posible observar de la Figura 3 que la isosista VIII se ubica en la zona norte donde se encuentra el máximo deslizamiento. Por otro lado, el área total de ruptura del terremoto, que en este caso es entre 450 km – 550 km, coincide con la zona delimitada entre las isosistas VII y VI. Es interesante destacar que la zona norte de máximo deslizamiento corresponde a una zona de liberación de energía en alta frecuencia (Kiser and Ishii (2011), Wang and Mori (2011), Koper et al., 2011a y Ruiz et al., 2012) lo que explica las altas intensidades sísmicas estimadas a partir de los daños observados en las estructuras rígidas de esta zona.

3. Comparación con los efectos del terremoto del 20 de febrero de 1835

Con este propósito, se compara la isosista del grado VI de la Figura 3 con la línea que limita la zona de daño del terremoto de Concepción del 20 de febrero de 1835, también conocido como el terremoto de Darwin. Según Davison (1936) esta línea es la indicada en la Figura 8, la cual se extiende entre los paralelos 34° a 38° de latitud sur, lo que representa una longitud del orden de 400 km de norte a sur. Lomnitz (1970) asigna a este terremoto una magnitud entre 8 y 8¼, magnitud menor que los 8.8 del terremoto del Maule 2010. Sin embargo es imperioso estudiar este importante terremoto y contextualizar su relación con otros terremotos como el terremoto de Concepción de 1960 Mw 8.2, Talca 1928 Mw 7.8 y Valparaíso 1985 Mw 8.0, lo cual permitiría comprender como interactúan grandes terremotos de magnitud Mw > 8.5 con terremotos Mw ~ 8.0. De esta comparación se comprueba que el área de daños del terremoto del 27 de febrero se extiende más al norte del terremoto de 1835, comprometiendo el sector norte del área de daños del terremoto de Talca de 1928 (Astroza et al, 2002).

Según Gómez (2004) una de las ciudades más afectadas por el terremoto de 1835 fue la ciudad de Concepción, la cual estaba construida mayoritariamente con adobes y ladrillos quedando con un 60% de sus viviendas y edificios de adobe destruidos (Grado de daño G3 o mayor, según la Tabla 2) y 81 personas muertas, de una población estimada en 30.000 habitantes (Gómez, 2004). Aceptando que las viviendas de adobe afectadas por el terremoto de 1835 pertenecen a una Clase A de vulnerabilidad, de acuerdo con la distribución de daños de la Tabla 1 y el porcentaje de viviendas destruidas destacado por Gómez, se puede estimar una intensidad sísmica entre un grado VII y VIII para la ciudad de Concepción, valor igual al estimado en la Tabla 4 para el terremoto del 27 de febrero de 2010.

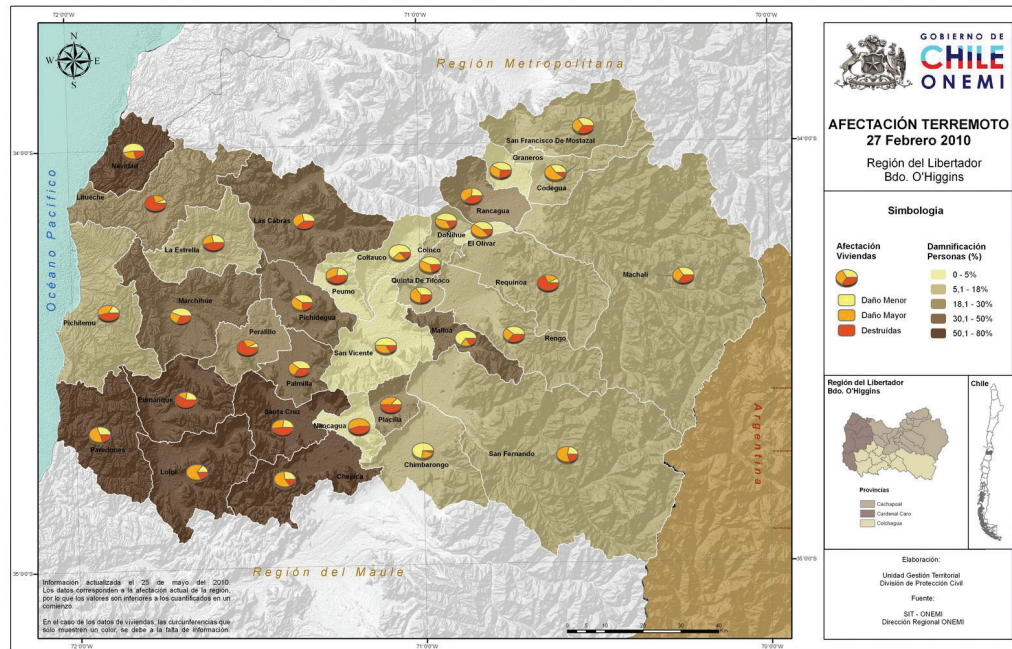


Figura 5. Afectación del terremoto de 27 de febrero de 2010. VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins (ONEMI, 2010).

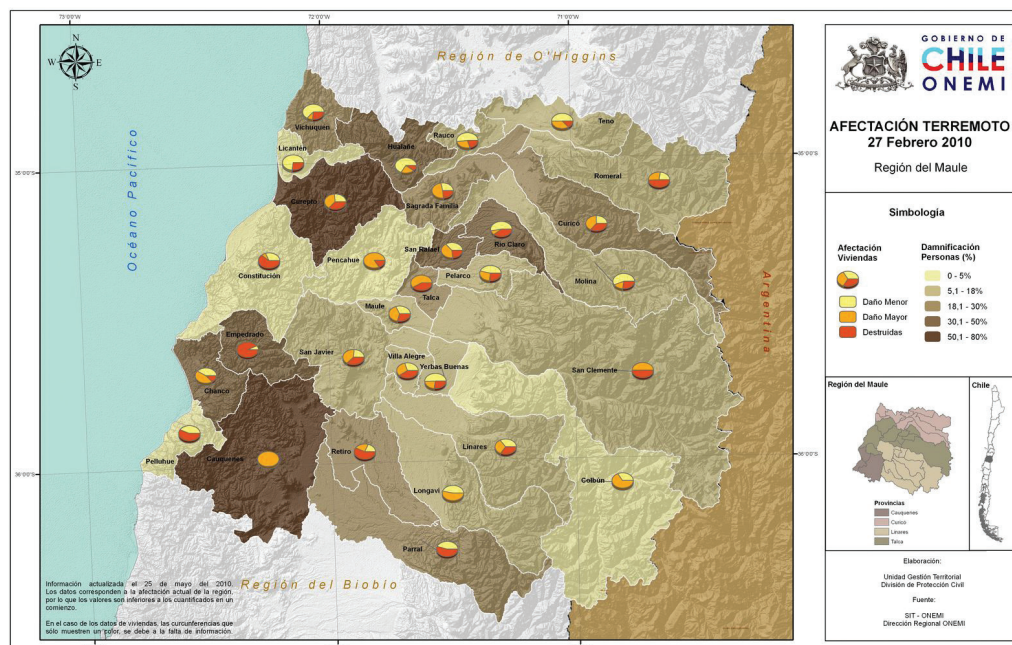


Figura 6. Afectación del terremoto de 27 de febrero de 2010. VII Región del Maule (ONEMI, 2010).

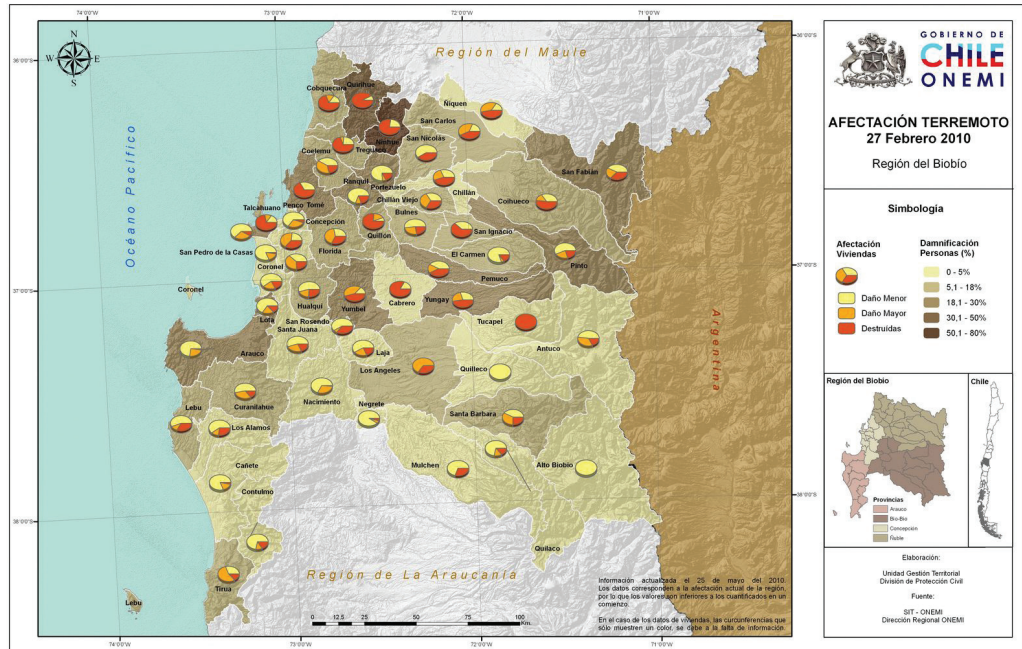


Figura 7. Afectación del terremoto de 27 de febrero de 2010. VIII Región del Bío Bío (ONEMI, 2010).



Figura 8. Línea que limita la zona de daño del terremoto de Concepción del 20 de febrero de 1835. (Davison, 1936).

Según Urrutia y Lanza (1993), en Curicó se cayeron cinco casas y las torres de las iglesias en el terremoto del 20 de febrero de 1835. En la costa, en lugares como Talcahuano, Tomé, Arauco y Constitución, la mayoría de los edificios cayeron con el sismo, terminando su devastación con el maremoto, que también produjo daños en las islas de Juan Fernández. En Santiago sólo se sintió como un “fuerte temblor”, lo que se puede interpretar como un temblor que no causó daños importante en los edificios pero sí alarma en la población, con este antecedente se puede estimar una intensidad sísmica no mayor que un grado VI en la ciudad de Santiago. Esta última estimación confirmaría que el terremoto del 27 de febrero de 2010 fue más destructivo que el terremoto de 1835, extendiéndose su área de daños más al norte de la ciudad de Rancagua, ciudad en la cual el terremoto de 1835 sólo produjo la *desnivelación* de algunas de sus casas (Urrutia y Lanza, 1993).

4. Atenuación de las intensidades

La atenuación de las intensidades se analiza considerando la distancia al hipocentro del terremoto y la distancia al centroide de la “aspereza principal”, ubicada al norte del área de ruptura del terremoto, ver Figura 3. Las coordenadas geográficas y la profundidad del hipocentro y del centroide de la “aspereza principal” se indican en la Tabla 4.

En la Figura 9 se grafican las intensidades sísmicas estimadas en función de la distancia al hipocentro y de la distancia al centroide de la “aspereza principal”, sin corregir los valores por las condiciones locales de sitio. De la figura se aprecia que para un determinado valor de la intensidad los datos se agrupan en forma más compacta, con menor dispersión, cuando se considera la distancia al centroide de la “aspereza principal”.

Tabla 4. Coordenadas y profundidad de la “aspereza principal” (Inferido de Tong et al., 2011) y del hipocentro (SSN, 2010).

	Latitud	Longitud	Profundidad (km)
Centroide aspereza principal	34.8°	72.6°	20
Hipocentro	36.29°	73.24°	30.1

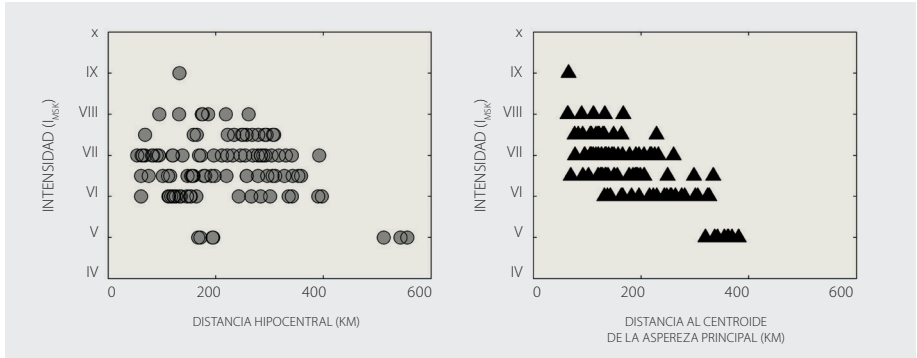


Figura 9. Intensidades del terremoto del 27F en función de la distancia al hipocentro y de la distancia al centroide de la “aspereza principal”.

Con el resultado de las Figuras 3 y 9 y comprobando que las fórmulas que establecen el decaimiento del valor promedio de la intensidad en función de la distancia al hipocentro o la distancia más corta a la proyección en la superficie del plano de falla dan una baja correlación, se determinó establecer la atenuación en función de la distancia a la aspereza principal (Δ_A), resultando para el terremoto del 27 de febrero la ecuación siguiente:

$$I_{Maule-2010}(\Delta_A) = 19.781 - 5.927 \cdot \log(\Delta_A) + 0.00087 \cdot \Delta_A \quad \text{Ec. 1}$$

En la Figura 10 se grafica esta ecuación, comprobándose que la atenuación del valor promedio de la intensidad queda bien representado por la Ecuación 1 y que el error que se puede cometer al calcular la intensidad es aproximadamente igual a 1/2 grado si se consideran límites de confianza del valor medio de un 95%, lo cual es aproximadamente igual a dos veces la desviación estándar al aceptar que la distribución del error es normal.

También se comprueba en la Figura 10 que la fórmula de atenuación propuesta por Barrientos (1980), –ver ecuación más abajo– para la magnitud del terremoto del 27 de febrero, $M_w=8.8$, no representa adecuadamente la atenuación del valor promedio de las intensidades estimadas en las 108 localidades ubicadas en el área de daño del terremoto del 27 de febrero de 2010, sobreestimando de manera importante las intensidades.

$$I_{BARR}(\Delta) = 1.3844 \cdot Mw - 3.7355 \cdot \log_{10}(\Delta) - 0.0006 \cdot \Delta + 3.8461$$

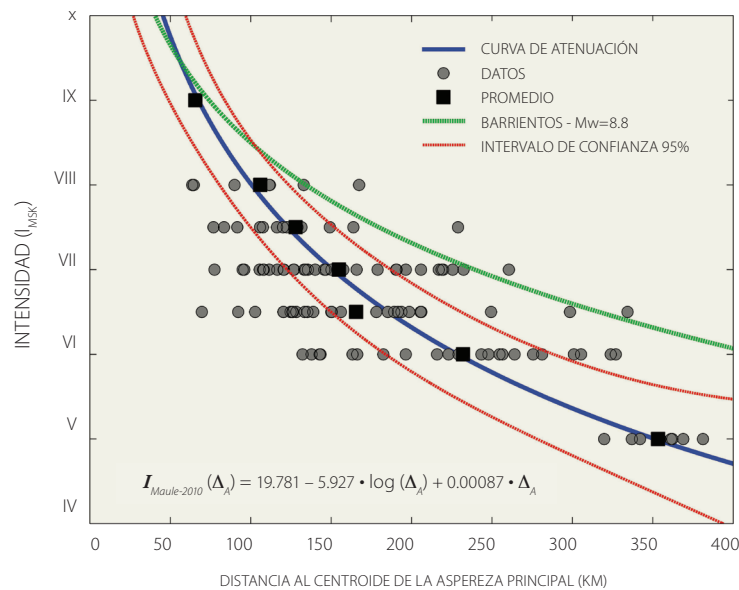


Figura 10. Atenuación de las intensidades del terremoto del 27 de febrero de 2010.

5. Intensidades en la ciudad de Santiago

Molina (2011) estimó las intensidades sísmicas del terremoto del 27 de febrero del 2010 en las 34 comunas del Gran Santiago, para lo cual inspeccionó los daños en 125 sectores, cuyos límites coinciden con los sectores encuestados en el terremoto del 3 de marzo de 1985 (Menéndez, 1991), lo que facilita la comparación entre ambos.

La intensidad sísmica de cada sector se calculó usando el método propuesto por Monge y Astroza (1989), considerando movilidad de la clase de vulnerabilidad a la cual pertenecen la muestra de viviendas de adobe y de albañilería sin refuerzo encuestadas. En total se inspeccionaron 6180 viviendas de adobe, albañilería sin refuerzo y albañilería reforzada (armada o confinada) de uno y dos pisos del tipo unifamiliar, distribuidas en las 34 comunas del Gran Santiago.

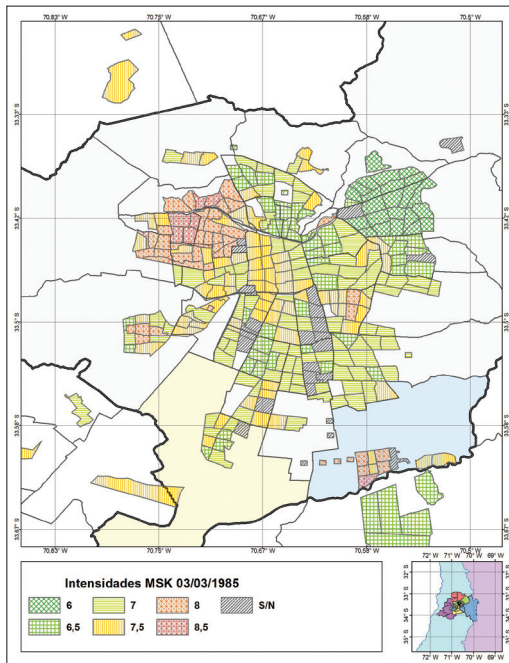
La movilidad de la clase de vulnerabilidad es necesario considerarla teniendo en cuenta que una estructura de adobe puede pertenecer a la Clase B en vez de la Clase A, y que una estructura de albañilería sin refuerzo puede pertenecer a la Clase C en vez de la Clase B (Monge y Astroza, 1989).

La intensidad estimada en cada uno de los sectores se muestra en la Figura 11, tanto cuando se considera como cuando no se considera la movilidad de la clase de vulnerabilidad. Además, se muestran las intensidades estimadas para el terremoto del 3 de marzo de 1985 (Menéndez, 1991).

A partir de la Figura 11 se comprueba que:

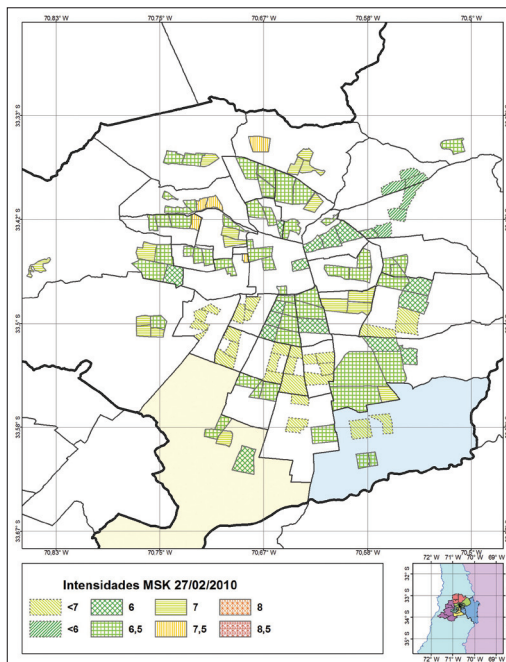
- Las intensidades aumentan entre 1 y $\frac{1}{2}$ grado al aceptar la movilidad de la clase de vulnerabilidad.
- Para ambos terremotos, las intensidades más altas se obtienen en los sectores ubicados al nor-poniente de Santiago, sobre depósitos de arcillas y limos (Leyton et al., 2011). En cambio, las zonas que presentan una intensidad menor pertenecen a las comunas de Las Condes y Vitacura, los cuales se ubican sobre depósitos de grava (Leyton et al., 2011).
- En la mayoría de los sectores que se encontraban poblados el año 1985, el terremoto del 3 de marzo produjo más daños que el terremoto del 27 de febrero del 2010 en las viviendas de uno y dos pisos, lo que se traduce en que en la intensidad del terremoto de 1985 fue mayor que la estimada para el terremoto del 2010.

De lo anterior se concluye que en la ciudad de Santiago, el terremoto del 3 de marzo de 1985 fue más severo que el terremoto del 27 de febrero del 2010 si se considera el comportamiento de las viviendas de uno y dos pisos que se utilizan para determinar la intensidad sísmica.

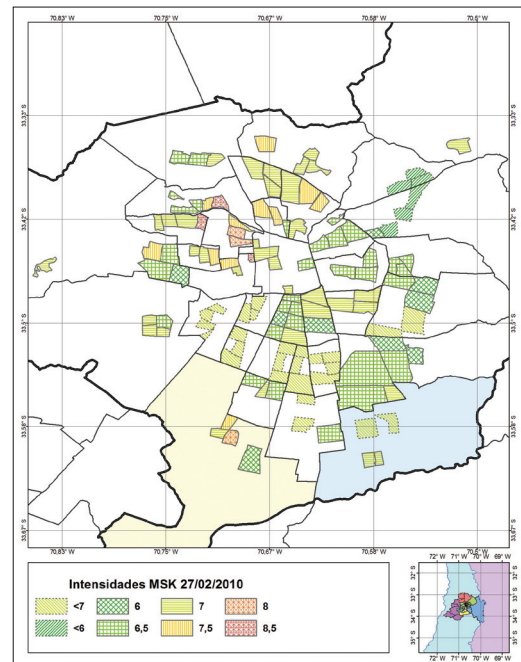


INTENSIDADES SÍSMICAS DEL 03/03/1985

Figura 11.
Intensidades sísmicas
en la ciudad de Santiago
(Molina, 2011).



INTENSIDADES SÍSMICAS DEL 27/02/2010
SIN CONSIDERAR MOVILIDAD DE LA CLASE
DE VULNERABILIDAD



INTENSIDADES SÍSMICAS DEL 27/02/2010
CONSIDERANDO MOVILIDAD DE LA CLASE
DE VULNERABILIDAD

Discusion y conclusiones

- La mayor liberación de energía en alta frecuencia en determinadas zonas del contacto sismogénico parece ser una característica de los mega-terremotos del tipo interplaca, observándose resultados similares para el terremoto de Tohoku 2011, Japón Mw 9.0 y Sumatra 2004, Mw 9.2 (Koper et al. (2011b), Meng et al. (2011), Wang and Mori (2011)). Estos resultados, confirmados por primera vez en forma empírica a partir del daño observado en estructuras rígidas durante el terremoto del Maule 2010 (Astroza et al., 2012), obligan a replantear los estudios de intensidades de daño de terremotos históricos y su relación con parámetros sísmicos como largo de ruptura y magnitud entre otros. Es necesario complementar el análisis de la intensidad sísmica con observaciones co-sísmicas y de tsunami las cuales están asociadas a energía del terremoto liberada en baja frecuencia.
- En los últimos 55 años en Chile han ocurrido dos terremotos de magnitud mayor que 8.5 al sur del paralelo 33° Sur con un área de ruptura que supera los 500 km, ellos son el terremoto del 22 de mayo de 1960 (Astroza y Lazo, 2010), y el del 27 de febrero de 2010. En estos dos eventos se observa que la intensidad sísmica no superó el grado VIII mientras no se presenten condiciones locales desfavorables como es la presencia de depósitos de origen lacustre, e.g: localidad de Llanquihue en 1960, y suelos arenosos con alta potencialidad de licuación, e.g: localidad Puerto Montt en 1960 y sectores de la comuna de Paine en 2010 (Contreras, 2012).
- Al comparar las intensidades estimadas a partir de los daños observados en las construcciones de uno y dos pisos de adobe y albañilería sin y con refuerzo en la ciudad de Santiago (Molina, 2011), se concluye que las intensidades del terremoto del 27 de febrero fueron menores que las estimadas para el terremoto de la Zona Central del 3 de marzo de 1985 (Menéndez, 1991) y que las reportadas para el terremoto de Valparaíso de 1906 por Montessus de Ballore (1915).
- Aún cuando la intensidad sísmica no es un parámetro que se utilice actualmente en las normas de diseño sísmico para establecer la demanda sísmica, su estimación es fundamental para calificar la severidad de un terremoto (e.g.: moderada, mediana y severa) y para comparar los efectos del ocurrido el 27 de febrero de 2010 con los terremotos chilenos históricos, en los cuales la intensidad sísmica es la única información disponible, no existiendo información instrumental de campo cercano (e.g.: registros de aceleraciones del suelo). Esta última información sólo se dispone en Chile desde 1945 y es muy limitada al momento de usarla por la falta de una red nacional de registros de movimiento fuerte de alta densidad.
- La situación anterior dificulta la posibilidad de caracterizar en forma confiable la demanda sísmica considerando los efectos asociados con la fuente sismogénica que da origen al terremoto, las condiciones locales que establecen los depósitos sobre los que se construyen las ciudades (geología superficial), y el nivel de la napa de agua.
- Mediante la estimación de la intensidad sísmica con la metodología usada para el terremoto del 27F, se ha podido reunir información que ha permitido cuantificar los efectos que tiene la geología superficial en la intensidad, y con ello contar con un antecedente adicional para realizar estudios de microzonificación sísmica de las principales ciudades del país. Sobre este tema en particular se han realizado algunos estudios en la ciudad de Santiago (Astroza y Monge, 1991a, Molina 2011), Valparaíso (Acevedo et al., 1989) y Concepción (Oppliger, 1968), entre otras.

- Desde el punto de vista de la destructividad del terremoto del 27 de febrero por efecto del movimiento del suelo, se puede destacar que aún cuando el área de ruptura tiene una longitud del orden de 500 km y el movimiento tuvo una larga duración, sólo un valor de la intensidad sísmica fue igual a IX grados y un 21% de las intensidades estimadas dentro del área de daño fue mayor que VII grados. Esta situación es una característica que se repite en los mega terremotos ($M_w > 8.0$) del tipo thrust que ocurren en la zona de subducción de Chile.
- Las intensidades más altas están determinadas por las condiciones geológicas y geotécnicas del lugar. En el caso de la ciudad de Constitución, la intensidad de IX grados corresponde al sector ubicado sobre una arena limosa en el plano de la ciudad. En cambio en el sector de los cerros que rodean esta ciudad, como son el cerro Chacarillas y el cerro Centinela, la intensidad fue menor, repitiéndose lo observado en la ciudad de Valparaíso en los terremotos de 1906 (Saragoni y Carvajal, 1991) y de 1985 (Acevedo et al, 1989).
- Los efectos de las condiciones locales también se observaron en otras ciudades ubicadas dentro de la zona de daño, siendo evidente por la distribución de los daños en las ciudades de Santiago (Molina, 2011) y Talca, ciudades donde se cuenta con una caracterización de la geología superficial que permite identificar este efecto. En la ciudad de Santiago se pudo confirmar lo observado durante el terremoto del 3 de marzo de 1985, lo mismo ocurre con la ciudad de Talca en la cual el estudio de los daños del terremoto del 3 de marzo de 1985 (Barrientos y Cancino, 1991) destaca la presencia de un daño mayor en el sector nor-oriental debido a la presencia de depósitos cineríticos (Morales y Sapaj, 1996).
- Teniendo en cuenta el tipo de construcción utilizado para determinar la intensidad sísmica, el daño experimentado por los edificios altos de hormigón armado y por los puentes y pasarelas prefabricadas de hormigón armado de autopistas urbanas e interprovinciales, no está relacionado directamente con los valores de las intensidades sísmicas en los sectores donde se encuentran estas construcciones. Teniendo en cuenta esta limitación, es fundamental tener información instrumental para cuantificar las demandas a las cuales estuvieron sometidas estas construcciones en términos de sus propiedades dinámicas, de su diseño arquitectónico y estructural y de las características dinámicas del suelo sobre el cual están fundados.
- Los daños más espectaculares (e.g.: colapsos) y que atrajeron la atención internacional, se deben principalmente a los efectos de las condiciones locales del sitio y al diseño arquitectónico y estructural. Producto de estos diseños se construyeron edificios con baja densidad de muros, con irregularidades a lo alto de ellos y un detallamiento de los refuerzos (armaduras u otros) inapropiado, lo que originó estructuras con una escasa integridad global y local.
- Además, durante la inspección de daños y de los informes de daño se pudo comprobar que la incorporación de nuevas normas de diseño y cálculo para edificios de albañilería de uso habitacional (NCh1928, 2003, NCh2123, 2003), ha contribuido a aumentar la calidad sismorresistente de este tipo de construcción, disminuyendo su vulnerabilidad sísmica al clasificarlas en las clases C o D de vulnerabilidad según la escala europea de intensidad sísmica (Grünthal, 1998). Esta realidad permite suponer que en el futuro los daños en estas construcciones no sobrepasarán un grado G3 en un escenario sísmico semejante al que ocurrió en los terremotos de 1985 y de 2010, mientras se respeten las disposiciones y limitaciones de las actuales normas de diseño y cálculo. De este modo, se puede esperar una reducción significativa de los damnificados al disminuir el número de viviendas declaradas inhabitables, como ocurre cuando el nivel de daño de una vivienda es mayor que un grado G3.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile por otorgar los recursos económicos para realizar la campaña de terreno necesaria para determinar las intensidades sísmicas del terremoto del 27 de febrero del 2010.

Referencias

- Acevedo, P., Astroza, M., Canales, J.C., Monge, J., Perretta, C., 1989, Relación entre las unidades geotécnicas y los daños producidos por el sismo del 3 de Marzo de 1985 en la ciudad de Valparaíso. 5as. Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago, Agosto, Vol. I, pp 515-523.
- Astroza M., 2007, Reinterpretación de las intensidades del terremoto de 1906, VI Congreso Chileno de Geotecnia, Valparaíso, Chile, Noviembre.
- Astroza, M., Cabezas, F., Moroni, M. O., Massone L., Ruiz S., Parra, E., Cordero F. and Mottadelli, A., 2010, Intensidades sísmicas en el área de daños del terremoto del 27 de febrero de 2010, <http://www.eqclearinghouse.org/20100227-chile/wp-content/uploads/2010/04/Informe de Intensidades>.
- Astroza, M. y Lazo, R., 2010, Estudio de los daños de los terremotos del 21 y 22 de Mayo de 1960, X Jornadas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago, Chile.
- Astroza, M., J. Monge y J. Varela, 1989, Zonificación sísmica de la Región Metropolitana, 5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Volumen 1, Santiago, Chile, Agosto, pp 493-503.
- Astroza, M. y J. Monge, 1991a, Seismic microzones in the city of Santiago. Relation damage-geological unit, Proceedings Fourth International Conference on Seismic Zonation, Volume III, Stanford, California, USA, pp 595- 601.
- Astroza M. y J. Monge, 1991b, Regional seismic zonation in Central Chile, Proceedings Fourth International Conference on Seismic Zonation, Volume III, Stanford, California, USA, pp 487- 494.
- Astroza M., A. Moya y S. Sanhueza, 2002, Estudio comparativo de los efectos de los terremotos de Chillán de 1939 y de Talca de 1928, VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Valparaíso, Chile.
- Astroza M., S. Ruiz and R. Astroza, 2012, Damage Assessment and Seismic Intensity Analysis of the 2010 (Mw8.8) Maule Earthquake, Submitted to Earthquake Spectra.
- Barrientos S., 1980, Regionalización Sísmica de Chile, Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias con Mención en Geofísica, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Barrientos P. y J. Cancino, 1991, Estudio de los efectos del sismo del 3 de marzo de 1985 en la Séptima Región, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- BID, 2006, Información para la gestión de riesgo de desastres. Estudio de casos de cinco países. Estudio de caso Chile, Banco Interamericano de Desarrollo,. Comisión Económica para la América Latina y el Caribe.
- Contreras J.M., 2012, Estudio de los efectos del terremoto del 27 de febrero de 2010 en la zona de las comunas de Buin y Paine de la Región Metropolitana, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Davison Ch., 1936, Great Earthquakes, T. Murby &Co., London, England.
- Delouis, B., Nocquet, J.M. and Vallée, M., 2010, Slip distribution of the February 27, 2010 Mw = 8.8 Maule Earthquake, central Chile, from static and high-rate GPS, InSAR and Broadband teleseismic data. Geophysical Research Letters, Vol 37, L17305, doi:10.1029/2010GL043899.

- Gómez, L., 2004, Los terremotos en el paisaje urbano de Concepción, Imprenta Austral, Concepción, Chile.
- Grünthal, G., 1998, European Macroseismic Scale 1992. Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 15, Luxembourg.
- INE, 2002, XVII Censo Nacional de Población y VI de Vivienda, Instituto Nacional de Estadísticas, Santiago, Chile (www.ine.cl).
- Kárník V., Z. Schenková and V. Schenk, 1984, Vulnerability and the MSK Scale, Engineering Geology, 20, pp 161-168.
- Kiser, E. and Ishii, M., 2011, The 2010 Mw 8.8 Chile earthquake: Triggering on multiple segments and frequency dependent rupture behavior, Geophys. Res. Lett doi:10.1029/2011GL047140.
- Koper, K., Hutko, A., Lay, Sufrim O., 2011a, Imaging Short-Period Seismic Radiation From the 27 February 2010 Chile (MW 8.8) Earthquake by Back-projection of P, PP, and PKIKP Waves, In press J. Geoph. Res.
- Koper, K., Hutko, A., Lay, T., Ammon, C. and Kanamori, H., 2011b, Frequency-dependent rupture process of the 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of short-period P wave back projection images and broadband seismic rupture models, Earth Planets Space, 63, 599–602.
- Lay, T., C. J. Ammon, H. Kanamori, K. D. Koper, O. Sufrí, and A. R. Hutko, 2010, Teleseismic inversion for rupture process of the 27 February 2010 Chile (Mw 8.8) earthquake, Geophys. Res. Lett., 37, L13301, doi:10.1029/2010GL043379.
- Leyton F., S. Sepulveda, M. Astroza, S. Rebolledo, P. Acevedo, S. Ruiz, L. Gonzalez, Cl. Fonca, 2011, Seismic zonation of the Santiago basin, Chile, 5 ICEGE International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago Chile, Enero.
- Lomnitz, C., 1970, Major earthquakes and tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955, Geologische Rundschau, 59, pp. 938-960.
- Lorito, S., Romano, F., Atzori, F., Tong, X., Avallone, A., McCloskey, J., Cocco, M., Boshi, E. and Piatanesi A., 2011, Limited overlap between the seismic gap and coseismic slip of the great 2010 Chilean earthquake, Nature Geoscience Letters, doi:10.1038/NGL01073.
- Medvedev, S.H. and Sponheuer, W., 1969. Scale of seismic intensity, Proceedings IV World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, A-2, 143–153.
- Menéndez P., 1991, Atenuación de las intensidades del sismo del 3 de marzo de 1985 en función de la distancia a la zona de ruptura y del tipo de suelo, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Meng, L., Inbal, A. and Ampuero, J.P., 2011, A window into the complexity of the dynamic rupture of the 2011 Mw 9 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. Res. Let., 38, L00G07, doi:10.1029/2011GL048118.
- Monge J. y M. Astroza, 1989, Metodología para determinar el grado de intensidad a partir de los daños, 5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Vol. 1, Santiago, Chile, pp 483-492.
- Molina, J., 2011, Intensidades sísmicas del terremoto del 27 de febrero de 2010 en las 34 comunas del Gran Santiago. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Montessus de Ballore F., 1915, Historia Sísmica de los Andes Meridionales al Sur del Paralelo XVI, Quinta Parte. El Terremoto del 16 de Agosto de 1906. Soc. Imprenta-Litografía Barcelona, Santiago, Chile.
- Morales, G. and Sapaj, D., 1996, Riesgo sísmico de las ciudades de Curicó, Molina, Talca, San Clemente, Constitución, Linares, San Javier, Parral y Cauquenes. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Moya A., 2002, Estudio de los daños del terremoto de Chillán de 1939, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- NCH2123, 2003, Norma Chilena NCh2123. Modificada en 2003, Albañilería confinada-Requisitos de diseño y cálculo, Segunda Edición, Instituto Nacional de Normalización, INN-Chile.

- NCh1928, 2003, Norma Chilena NCh1928. Modificada en 2003, Albañilería armada-Requisitos para el diseño y cálculo, Segunda Edición, Instituto Nacional de Normalización, INN-Chile.
- NCh433, 2011, Norma Chilena NCh433.Of1996, mod.2009-Decreto Num.117, 2011, Diseñ sísmico de edificios, Instituto Nacional de Normalización, INN-Chile.
- Norambuena A., 2006, Estudio de los efectos del terremoto de La Ligua del 28 de Marzo de 1965, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- ONEMI, 2010, http://www.ONEMI.cl/html/archivo/seccion_2.html
- Oppliger G., 1968, Microregionalización sísmica de la ciudad de Concepción, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Pollitz, F. F., B. Brooks, X. Tong, M. G. Bevis, J. H. Foster, R. Bürgmann, R. Smalley Jr., C. Vigny, A. Socquet, J.-C. Ruegg, J. Campos, S. Barrientos, H. Parra, J. C. B. Soto, S. Cimbaro, and M. Blanco., 2011, Coseismic slip distribution of the February 27, 2010 Mw 8.8 Maule, Chile earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09309, doi:10.1029/2011GL047065.
- Pulido, N., Yagi, Y., Kumagai, H. and Nishimura, N., 2011, Rupture Process and coseismic deformations of the 27 February 2010 Maule earthquake, Chile, *Earth Planets Space*, 63, 1-4.
- Ruiz, S., Madariaga, R., Astroza, M., Saragoni, G. R., Lancieri, M., Vigny, C and Campos, J., 2012, Short Period Rupture Process of the 2010 Mw 8.8 Maule Earthquake in Chile, Submitted to *Earthquake Spectra*.
- Sanhueza S., 2002, Estudio de los daños del terremoto de Talca de 1928, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Sandoval M., 2004, Estudio de los efectos del sismo fuerte de Santiago del 13 de Septiembre de 1945, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Saragoni G.R. y A. Carvajal, 1991, Microzonation considering large earthquake, *Proceedings Fourth International Conference on Seismic Zonation*, Vol III, Stanford California, USA, pp 495-502.
- S.S.N., 2010, Informe Técnico Terremoto Cauquenes 27 Febrero 2010, Servicio Sismológico, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Sepúlveda SA, Astroza M, Kausel E, Campos J, Casas EA, Rebolledo S, and Verdugo R., 2008, New findings on the 1958 Las Melosas earthquake sequence, central Chile: Implications for seismic hazard related to shallow crustal earthquakes in subduction zones, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(3), pp. 432-455.
- Tong, X., Sandwell, D., Luttrell, K., Brooks, B., Bevis, M., Shimada, M., Foster, J., Smalley Jr., R., Parra, H., Báez Soto, J. C., Blanco, M., Kendrick, E., Genrich, J. and Caccamise, D. J., 2011, The 2010 Maule, Chile earthquake: Downdip rupture limit revealed by space geodesy, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2010GL045805.
- Urrutia R. y C. Lanza, 1993, *Catástrofes en Chile 1541-1992*, Editorial La Noria, Primera Edición, Chile.
- Vigny, C., Socquet, A., Peyrat, S., Ruegg, J.C., Métois, M., Madariaga, R., Morvan, S., Lancieri, M., Lacassin, R., Campos, J., Carrizo, D., Bejar-Pizarro, M., Barrientos, S., Armijo R., SSN team, LIA-MdB team and CAP team., 2011, The 2010 (Mw 8.8) Maule Mega-Thrust Earthquake of Central Chile, monitored by GPS, *Science*, 331, pp. 1417-1421.
- Wang, D. and Mori, J., 2011, Frequency dependent energy radiation and fault coupling for the 2010 Mw 8.8 Maule, Chile, and 2011 Mw9.0 Tohoku, Japan, earthquakes, *Geophys. Res. Lett.* doi:10.1029/2011GL049652.