

Evolución de la degradación del suelo de Concepción para el terremoto de El Maule 2010

Soil degradation evolution in Concepción for the El Maule earthquake 2010

Fecha de entrega: 20 de enero 2022

Fecha de aceptación: 4 de abril 2022

Rubén Ramos y G. Rodolfo Saragoni

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, rubenramosalas@gmail.com, rsaragon@ing.uchile.cl

La amplificación dinámica lleva décadas de estudio. Por ejemplo, a raíz del terremoto de 1960 se caracterizó el suelo y amplificación de desplazamientos para Concepción (Poblete y Dobry, 1968). Sin embargo, el terremoto de El Maule del 2010 entregó sorpresivamente un espectro de dos picos para el sitio. El pico de periodos altos se atribuye al sitio, mientras que para periodos bajos a la fuente. El estudio de los registros de desplazamiento de las estaciones Concepción Centro y San Pedro de la Paz identifica dos pulsos (Ruiz y Saragoni, 2012). Las características de estos pulsos y sus frecuencias los relaciona principalmente con ondas superficiales tipo Love (Ramos, 2021). Los suelos de fundación de las estaciones conformados por arenas, cuyas deformaciones horizontales cíclicas permiten estimar su degradación de la rigidez; y teóricamente un aumento en sus periodos de vibrar. Esta predicción se valida al examinar los registros de desplazamiento y espectrogramas de aceleraciones para las estaciones. Las deformaciones y periodos varían sus magnitudes a lo largo del registro. Pudiéndose relacionar el periodo del suelo degradado en la fase fuerte del terremoto con el periodo medido por el método H/V. También puede entenderse el periodo estimado con la técnica de “Autocorrelograma” es un promedio de los anteriores (Sandoval y Saragoni, 2016). Esto da acceso a la evaluación del periodo del suelo en diversas fases o magnitudes de terremotos, útiles en los estudios de amenaza sísmica.

Palabras clave: amplificación dinámica, degradación del suelo, periodo, pulso, onda Love, terremoto El Maule 2010

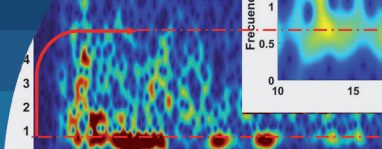
Dynamic amplification takes decades of study. For example, as a result of the 1960 earthquake, the soil and drift displacement amplification were characterized for Concepción city (Poblete and Dobry, 1968). However, the 2010 El Maule earthquake surprisingly delivered a two-peak spectrum for the site. The peak of high periods is attributed to the site, while for low periods to the source. The study of the displacement records of the Concepción Centro and San Pedro de la Paz stations identifies two pulses for this event (Ruiz and Saragoni, 2012). The characteristics of these pulses and their frequencies are related mainly to Love-type surface waves. The foundation soils of the stations are made up of sands, whose cyclical horizontal deformations allow estimating their rigidity degradation; and theoretically an increase in their vibrating periods. This prediction is validated by examining the shift registers and acceleration spectrograms for the stations. The deformations and periods vary their magnitudes throughout the record. The period of the degraded soil in the strong phase of the earthquake can be related to the period measured by the H/V method. The estimated period with the “Autocorrelogram” technique (Sandoval and Saragoni, 2016) can also be understood as an average of the previous ones. This gives access to evaluation of the period of the soil in different phases or magnitudes of earthquakes, useful in seismic hazard studies.

Keywords: dynamic amplification, soil degradation, period, pulse, Love wave, El Maule Earthquake 2010

Introducción

Los terremotos de Concepción y Valdivia, del 21 y 22 de mayo de 1960 respectivamente, mostraron que el efecto del

suelo era importante para la respuesta sísmica; esperándose amplificaciones importantes en suelos blandos. Esto llevó a estudios teóricos y experimentales para su cuantificación.



Es así como se realizó un modelo teórico para terremotos fuertes con la influencia del suelo del sitio (Arias y Petit Laurent, 1965), trabajo que permitió incluir este efecto en la norma de diseño sísmico de edificios NCh433 (1972); incluso antes que las normas norteamericanas. En lo práctico, se realizaron sondajes profundos en la ciudad de Concepción por parte de IDIEM para caracterizar los parámetros que definen la respuesta dinámica del suelo de la ciudad (Dobry 1966; Poblete y Dobry, 1968), con lo que se estaría preparado para futuras eventos sísmicos en la ciudad al poder estimar las amplificaciones del suelo.

Sin embargo, el terremoto de El Maule 2010 entregó sorpresas para la comunidad de ingeniería. Este sismo dejó, por primera vez a nivel mundial, un acelerograma de movimiento fuerte en zona epicentral de magnitud $M_w = 8.8$, de ahí la importancia de analizar este registro por sus múltiples lecciones para la práctica de la ingeniería. Primero, entrega un espectro de respuesta de aceleraciones con dos peaks para la ciudad de Concepción (Boroschek *et al.*, 2012), y también para San Pedro de la Paz en menor grado. En ambos casos el peak que se produce para los periodos altos está relacionado a efectos de sitio en su suelo de fundación, aunque los máximos se producen para periodos un poco superiores a los estimados para el sitio (IDIEM, 2012). En tanto el peak para periodos bajos ocurre exactamente para el mismo periodo en ambas estaciones, situación que confirma que se trata de una señal de la fuente sísmica o aspereza dominante (Saragoni y Ruiz, 2012).

Una segunda sorpresa del terremoto de El Maule se encuentra al revisar y comparar los registros de desplazamiento de las estaciones vecinas de Concepción y San Pedro de la Paz. En este registro se encuentran dos pulsos de desplazamiento para la componente N60°E, los que se producen simultáneamente y tienen igual amplitud (Saragoni y Ruiz, 2012), lo que indica señales que llegan al sitio desde la fuente sísmica, y no a amplificaciones que se produzcan en el sitio. Adicionalmente a esto, la amplitud espectral del primer peak (periodos cortos) se produce al instante de los pulsos. El estudio de su polarización de desplazamientos, así como la frecuencia en que se producen, permite relacionar estas señales con ondas superficiales tipo Love en el sitio. Mientras que el segundo peak espectral se produce en el intervalo de tiempo entre los dos pulsos identificados, y está más asociado a amplificación en el sitio, pero ello no responde todo.

Al estudiar los registros sísmicos y sus espectrogramas, estos dan cuenta de cambios en el periodo o rigidez del suelo producto de la amplitud de las deformaciones cíclicas durante las diferentes fases del terremoto.

En este trabajo se describe la relación del registro sísmico con las ondas superficiales tipo Love en el sitio. También muestra como varía el periodo con que vibró el sitio en ambas estaciones durante la evolución del terremoto. Finalmente, se asocian estos periodos con diferentes metodologías de medición como lo son H/V, o de estimación por “Autocorrelograma” del registro. De otra forma, es un inicio o llamado a una investigación mayor en este sentido.

Antecedentes de las estaciones

En la provincia de Concepción el terremoto de El Maule fue registrado por dos estaciones sismológicas, una en el centro de Concepción y la otra en la comuna de San Pedro de la Paz. Estas estaciones estaban separadas aproximadamente 5.6 kilómetros en una dirección cercana a la Este-Oeste.

La estación de Concepción centro estaba ubicada en el Colegio Inmaculada Concepción, en calle Aníbal Pinto 340, a un costado de la plaza de la Independencia (Coordenadas WGS84: 674009.87 m Este, 5922455.35 m Sur). No se contó con un sondaje del suelo precisamente en el lugar, pero sí uno distanciado cerca de 200 m en la calle Castellón, el que se considera representativo del sitio (coordenadas WGS84: 674171.69 m Este, 5922685.56 m Sur). La estratigrafía se resume en la Tabla 1, mientras que las velocidades de onda de corte V_s medidas en el sitio se muestran en la Tabla 2 (Poblete y Dobry, 1968). Según la caracterización estratigráfica, se considera una profundidad “deformable” de 117 m.

La estación de San Pedro de la Paz estaba ubicada en el Colegio Concepción, calle Los Acacios 107 de esa comuna (coordenadas WGS84: 668676.07 m Este, 5920719.02m Sur), y contaba con un sondaje en el mismo sitio. La estratigrafía para esta estación se resume en la Tabla 3, mientras que las velocidades de onda de corte V_s medidas en el sitio se muestran en la Tabla 4 (IDIEM, 2012). Según la caracterización estratigráfica se considera una profundidad “deformable” de 66.1 m.

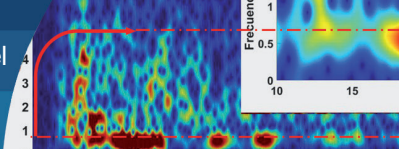


Tabla 1: Estratigrafía observada en sondaje estación Concepción Centro (Poblete y Dobry, 1968)

Horizonte	Cotas límite, m		Espesor, m	Descripción del material
	Inicial	Final		
H-1	0.00	0.80	0.80	Relleno de escombros.
H-2	0.80	3.50	2.70	Arena media a fina, limosa; suelta.
H-3	3.50	4.70	1.20	Arena media, algo limosa; muy compacta.
H-4	4.70	9.40	4.70	Arena fina a muy fina; compacidad media.
H-5	9.40	12.00	2.60	Limo arenoso, compacto.
H-6	12.00	24.90	12.90	Arena media, algo limosa; compacta.
H-7	24.90	27.50	2.60	Limo de alta compresibilidad, plástico, algo orgánico; consistencia media.
H-8	27.50	31.90	4.40	Arena muy fina, limosa; muy compacta (cementada?)
H-9	31.90	32.50	0.60	Limo muy consistente
H-10	32.50	34.40	1.90	Arena media, algo limosa; densa.
H-11	34.40	36.50	2.10	Arcilla de mediana plasticidad; consistencia media a alta
H-12	36.50	43.10	6.60	Limo arenoso y arena limosa; muy compacto (cementado?)
H-13	43.10	45.80	2.70	Limo de baja compresibilidad; muy consistente.
H-14	45.80	55.60	9.80	Arena fina interestratificada con limo; muy compacta
H-15	55.60	59.60	4.00	Limo arenoso
H-16	59.60	62.80	3.20	Limo de compresibilidad media, algo orgánico
H-17	62.80	66.10	3.30	Arena muy fina, limosa.
H-18	66.10	75.10	9.00	Limo arenoso y arena por capas; a 69.0 m limo muy blando
H-19	75.10	85.00	9.90	Limo de alta compresibilidad, inorgánico, plástico.
H-20	85.00	107.00	22.00	Horizonte interestratificado de arena fina Bío-Bío, gruesa cuarzosa y limo. Abundan los elementos minerales no Bío-Bío.
H-21	107.00	133.70	26.70	Ripio grueso y bolones predominantemente graníticos.
H-22	133.70			Muy probablemente roca granítica.

Tabla 2: Velocidades de ondas de corte (V_s) para la estación Concepción Centro (Poblete y Dobry, 1968)

Estrato	Cotas límite, m		V_s , m/s
	Inicial	Final	
H-2 a H-6	1.0	18.0	210.0
H-6	18.0	24.9	207.0
H-7 a H-10	24.9	34.4	348.0
H-11 a H-12	34.4	40.0	262.0
H-12 a H-13	40.0	45.8	264.0
H-14	45.8	51.0	267.0
H-14	51.0	55.6	314.0
H-15 a H-18	55.6	75.1	308.0
H-19	75.1	85.0	317.0
H-20	85.0	102.5	565.0
H-21	102.5	117.0	373.0

Tabla 3: Estratigrafía observada en sondaje estación San Pedro de la Paz (IDIEM, 2012)

Horizonte	Cotas límite, m		Espesor, m	Descripción del material
	Inicial	Final		
H-1	0.00	4.50	4.50	Arena limosa color negro, compacidad baja y humedad media. Presencia de gravas dispersas de cantos angulares, tamaño máximo 2".
H-2	4.50	25.50	21.00	Arcilla color café, consistencia alta, humedad alta y plasticidad baja. Presencia variable de gravas dispersas de cantos angulares, tamaño máximo 2".
H-3	25.50	66.10	40.60	Roca metamórfica color gris muy meteorizada. Presencia de incrustaciones de roca color blanco y arcillas.
H-4	66.10	80.75	14.65	Roca metamórfica color gris fracturada en distintos grados. Presencia de incrustaciones y vetillas de roca color blanco y arcillas muy consolidadas.

Tabla 4: Velocidades de ondas de corte (V_s) para estación San Pedro de la Paz (IDIEM, 2012)

Estrato	Cotas límite, m		V_s , m/s
	Inicial	Final	
H-1	0	4.5	370
H-2	4.5	25.5	370
H-3	25.5	66.1	560
H-4	66.1	80.75	1600

El periodo fundamental de un estrato puede ser calculado con la expresión de la ecuación (1).

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (1)$$

Para Concepción Centro, usando la velocidad de onda promedio ponderado de los estratos se obtiene un periodo de 1.40 s. El periodo estimado por el método de Nakamura, HVSR, es de 1.45 s para el mismo lugar (Leyton, 2019).

Por su parte para San Pedro de la Paz, la ecuación (1) estima un periodo de 0.45 ó 0.54 s, si se considera o no la roca metamórfica respectivamente. El método de Nakamura estima un periodo de 0.45 s para este sitio.

Como se muestra más adelante en este estudio, los periodos del suelo estimados por método de Nakamura son largamente superados en el sitio en la fase fuerte del terremoto.

Análisis de los registros sísmicos y contenido de frecuencias

Los registros del sismo de El Maule 2010 están disponibles para su estudio por la comunidad de ingeniería (Boroschek *et al.*, 2010). El presente estudio se concentra en la componente longitudinal del registro, es decir, la N60°E, que es la que contiene las señales sísmicas relacionadas con la directividad observada en el daño (Ramos, 2021; Ramos y Saragoni, 2020).

La Figura 1 muestra la componente N60°E de los registros de desplazamiento para las estaciones de Concepción Centro (azul) y San Pedro de la Paz (rojo), describiendo sus fases más importantes. En ella se aprecia con claridad la existencia de dos pulsos que se producen en el mismo tiempo del registro, y con similares amplitudes y duración (Saragoni y Ruiz, 2012). También se aprecia que pasado el primer pulso (16 a 25 s) los dos registros muestran una vibración impuesta de periodo cercano a 2.0 s, sobre una especie de pendiente creciente en el sentido positivo de los desplazamientos; y sobre la que el registro de San Pedro de la Paz se monta una vibración con un periodo aproximado a 0.7 s. Pasado el pulso 2 (32 a 45 s), este fenómeno de vibración impuesta se aprecia con menor nitidez.

Lo descrito anteriormente da cuenta de vibraciones forzadas, de ondas propagadas desde la fuente, que excitan



Figura 1: Registros de desplazamientos para Concepción y San Pedro, N60°E. Fases de importancia

el suelo de fundación de ambas estaciones. Los periodos de vibración del suelo son mayores a los estimados y medidos para las estaciones como se muestra en la Figura 2. Este aumento en el periodo puede ser entendido si se tiene en cuenta el cociente entre la amplitud de las deformaciones cíclicas del registro y la profundidad de los estratos, la que da cuenta de una importante degradación de la rigidez. Una constitutiva de degradación no lineal de rigidez (G) versus deformación (γ), entregaría una degradación baja antes del pulso, degradación entre 40 a 60% en la fase fuerte entre los 10 y 32 s considerando curvas constitutivas estándar de degradación, y finalmente recobraría rigidez pasada esta fase fuerte de grandes amplitudes. Estas degradaciones de rigidez de suelo se han evidenciado en otros terremotos (Archuleta *et al.*, 2000; Bonilla *et al.*, 2011 y 2021).

La reducción de rigidez es solamente una estimación, ya que no se cuenta con curvas específicas, claramente la desangulación y por tanto la degradación no es uniforme en la profundidad. Por lo anterior, es una simplificación que intenta explicar el fenómeno con un comportamiento promedio.

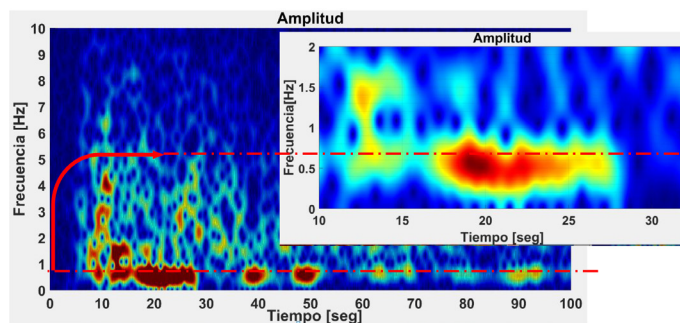
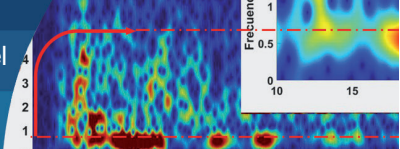


Figura 2: Espectrograma para el acelerograma de Concepción Centro. Componente N60°E. (La línea roja indica frecuencia teórica y de Nakamura)



La Figura 2 muestra el espectrograma para el acelerograma de Concepción Centro, componente N60°E, en la que se ve que en la fase inicial del registro el suelo vibra a un periodo cercano a 1.4 s predicho por Nakamura. Pero con la llegada del primer pulso este periodo crece alcanzando y manteniendo el valor cercano a 2.1 s en la fase de interpulsos.

Por otra parte, la Figura 3 muestra el espectrograma para el acelerograma de San Pedro de la Paz, donde se ve con claridad que durante la fase fuerte del registro el suelo vibró a un periodo aproximado de 0.75 s muy lejos de la predicción de Nakamura y teórico.

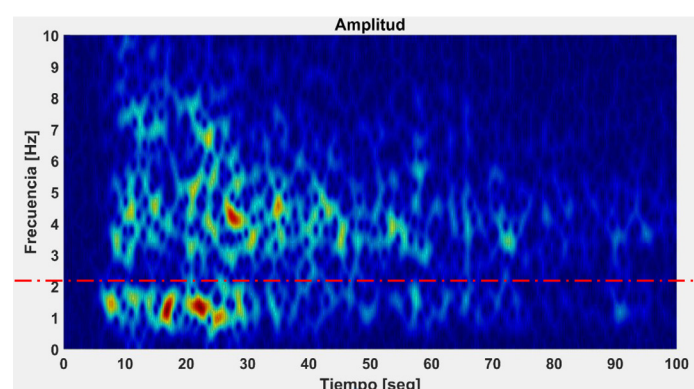


Figura 3: Espectrograma para el acelerograma de San Pedro de la Paz. Componente N60°E. (La línea roja indica periodo teórico y Nakamura)

Por lo tanto, la revisión de los espectros de desplazamiento y espectrogramas para las estaciones dan cuenta de periodos de vibración muy superiores a los predichos por la teoría y medidos por Nakamura. Las similitudes vistas en las estaciones para las amplitudes de vibraciones y periodos en que se producen dan cuenta de que son ondas que se propagan desde la fuente hasta el sitio de las estaciones. También la amplitud de las deformaciones cíclicas producidas durante la fase fuerte del terremoto muestra que debe existir una importante degradación en su rigidez, lo que explicaría el aumento de periodo.

Otro aspecto que resaltar es que los espectrogramas demuestran que las vibraciones del suelo no son aleatorias. Estas se producen en determinados rangos de frecuencias o periodos. También cabe señalar aquí que el lapso de tiempo desde el inicio del Pulso 1 al término del Pulso 2 da forma por completo al espectro de respuesta de aceleraciones para ambas estaciones (Ramos, 2021).

Relación con ondas Love del sitio

Para entender con claridad los efectos observados es importante aclarar sus causas. Para esto se describirá qué son los pulsos visualizados en el registro de respuesta. La Figura 4(a) muestra el odograma de los desplazamientos horizontales para las estaciones de Concepción Centro (azul) y San Pedro de la Paz (rojo), con filtro normal tipo Butterworth de orden 4, con pasa banda alta y baja en [0.05 y 25]Hz para ambos registros, para las componentes N60°E y N30°W durante el Pulso 1; en donde se aprecia un comportamiento temporal, polarización de desplazamientos en dirección N60°E y de amplitudes de deformaciones similares. Además, se marcan bucles en el odograma, los que ocurren el mismo instante del registro en ambas estaciones, y producen los máximos espectrales de los registros (Ramos, 2021).

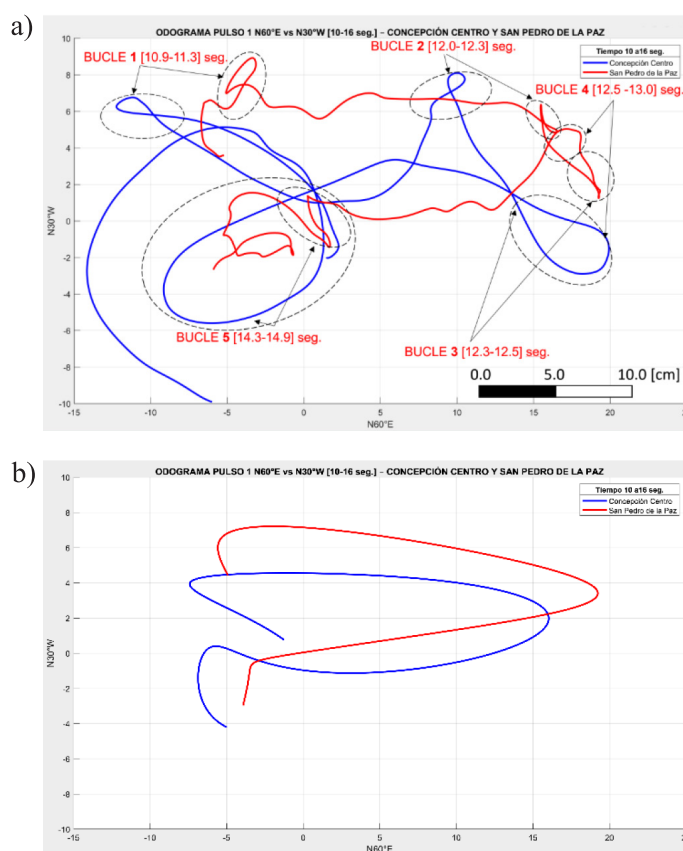
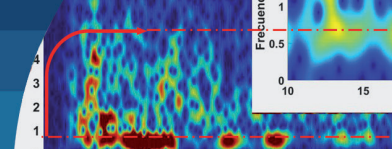


Figura 4: a) Odograma de deformaciones Concepción (azul) y San Pedro de la Paz (rojo). N60°E y N30°W y b) odograma de deformaciones Concepción (azul) y San Pedro de la Paz (rojo). N60°E y N30°W. Filtrado



Por su parte la Figura 4(b) muestra el mismo odograma con filtro tipo Butterworth de orden 3, con pasa banda alta y baja en [0.05 y 0.55]Hz para ambos registros, dejando fuera el efecto de los modos inferiores atribuibles al sitio. De esta manera se evidencia que la señal sísmica que llega en la ventana de tiempo del Pulso 1 es la misma para ambas estaciones, y dada su polarización corresponde a una onda superficial tipo Love con polarización horizontal N60°E. Entonces el pulso observado en ambos registros corresponde a la respuesta de ambos sitios a una misma señal sísmica. Este pulso tiene un periodo cercano a 6 s (0.167 Hz).

Dado que los pulsos son señales provenientes de la fuente, que los bucles se producen en el mismo instante y que las frecuencias o modos dominantes en espectros y espectrogramas ocurren de estos pulsos, más precisamente al tiempo de los bucles (Ramos, 2021), es que se pasa a investigar y proponer la posible causa de respuesta en esas frecuencias específicas. Para explicar la razón de que el espectrograma de la dirección horizontal N60°E muestra que los periodos o frecuencias del suelo se ubican en determinados campos o rangos, se recurre a la descripción de las ondas Love; dado que estas ondas se mueven polarizadas en dirección perpendicular y horizontal a la dirección de propagación del rayo sísmico. La ecuación (2) rige las frecuencias y velocidades de propagación de estas ondas.

$$\tan\left(\frac{\omega h}{V_{S1}} \sqrt{1 - \left(\frac{V_{S1}}{c}\right)^2}\right) - \frac{V_{S2}}{V_{S1}} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{\frac{\left(\frac{V_{S2}}{V_{S1}}\right)^2 - \left(\frac{c}{V_{S1}}\right)^2}{\left(\frac{c}{V_{S1}}\right)^2 - 1}} = 0 \quad (2)$$

Donde h es la profundidad del estrato superior y superficial, V_{S1} es la velocidad de propagación de ondas de corte del estrato superior, V_{S2} es la velocidad de propagación onda de corte en el estrato inferior, ω es la frecuencia asociada al modo de onda Love y c es la velocidad de fase de la onda Love, la cual es función de ω .

La Figura 5 muestra la comparación entre las frecuencias de dispersión obtenidas mediante la técnica de espectrograma en comparación con las frecuencias de modos de onda Love para el sitio de Concepción Centro, aplicando la ecuación (2) a los parámetros para el suelo degradado del

sitio. También se observa que para los tiempos entre 0 y 10 s, así como para superiores a 60 s, el periodo del suelo es bastante similar al predicho por el método de Nakamura y otros métodos, de 1.40 s (0.71 Hz). Pero en la fase fuerte del terremoto, entre los 10 y 60 s, el periodo se encuentra en los 2 s (0.5 Hz).

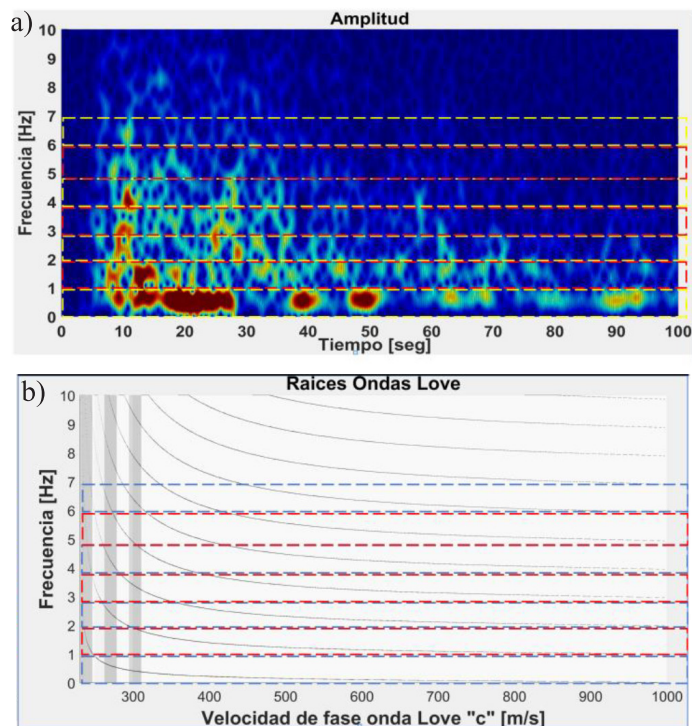


Figura 5: Comparación entre a) Espectrograma y b) modos de dispersión de onda Love para Concepción Centro. Componente N60°E. Las líneas segmentadas muestran los campos de frecuencia de modos de onda Love

La Figura 6 muestra la comparación entre las frecuencias del espectrograma en comparación con las frecuencias de modos de onda Love para el sitio de San Pedro de la Paz, aplicando la ecuación (2) a los parámetros para el suelo degradado en el sitio. También se observa que para los tiempos entre 0 y 10 s, así como para superiores a 60 s, el periodo del suelo es bastante similar al predicho por el método Nakamura y función de V_s de un valor cercano a 0.5 s (2 Hz). Pero en la fase fuerte del terremoto, entre los 10 y 60 s, el periodo se encuentra en los 0.7 s (1.4 Hz).

Cabe señalar que esto es una simplificación, dada la composición estratigráfica que requiere una modelación más rigurosa. No obstante, se estima como una buena estimación promedio de las frecuencias predominantes, las cuales se encuentran en el rango de modos de onda Love para el sitio.

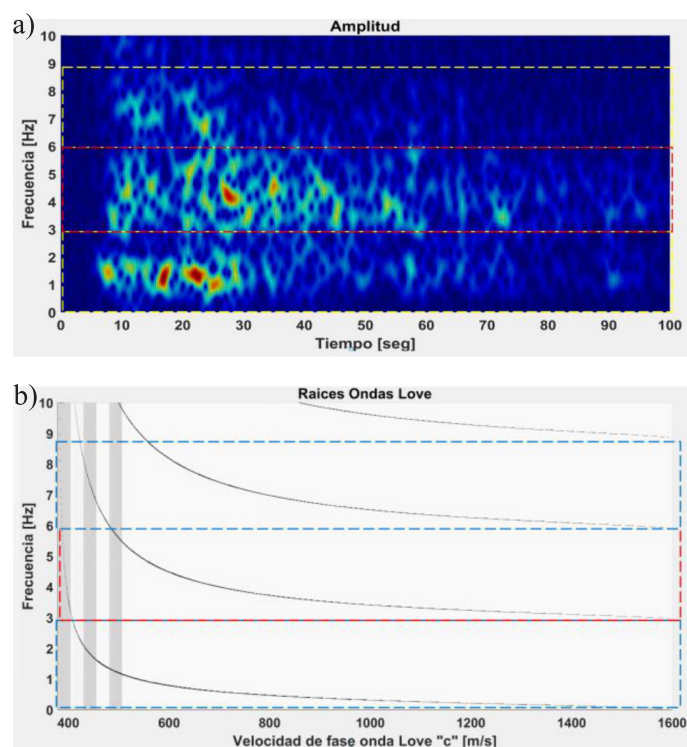
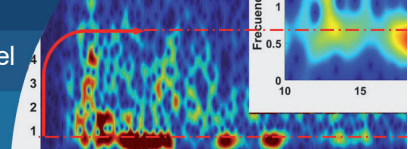


Figura 6: Comparación entre a) Espectrograma y b) modos de dispersión de onda Love para San Pedro de la Paz. Componente N60°E. Las líneas segmentadas muestran los campos de frecuencia de modos de onda Love

Por lo tanto, se observa y sugiere que los efectos observados en el registro de desplazamiento, así como en el espectrograma, son consecuencia de propagación de ondas en el sitio, dominadas durante el terremoto por ondas superficiales tipo Love para los sitios de las estaciones de Concepción Centro y San Pedro de la Paz. Entonces, la ecuación que describe este tipo de ondas es la que se debe usar para evaluar la amplificación en este caso. Esta sería la razón de porqué la técnica de amplificación dinámica no resulta precisa para el estudio de la magnitud en la amplitud de la amplificación. Las ondas de tipo Love corresponden a vibraciones forzadas dispersivas, las que se difuminan una vez superado el efecto causal, como se ve en el espectrograma. La metodología usada para el estudio de la amplificación dinámica está más bien asentada para vibraciones forzadas por ondas de corte que llegan verticalmente a la superficie durante todo el registro. Por lo que este estudio sugiere ampliar la investigación en esta dirección.

Comentario de la técnica de autocorrelograma

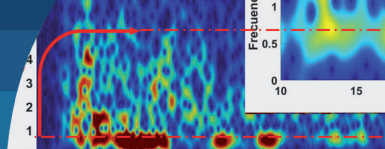
La técnica del autocorrelograma presenta una excelente técnica para obtener periodos y amortiguamientos del suelo (Sandoval *et al.*, 2016). Sin embargo, vale la pena precisar que esta técnica se usó para el registro completo, razón por la cual lo que se obtiene es el periodo promedio ponderado de todo el registro. A raíz de lo mostrado en el presente estudio notar que se debe segmentar el registro según la fase del movimiento y evaluar según cada uno de esos tramos, con lo que se puede obtener una medida del periodo en la respuesta al terremoto de acuerdo a las amplitudes de desplazamiento que esté desarrollando el sitio.

Conclusiones y comentarios

Se presenta evidencia que el periodo de vibración no permanece constante a través del tiempo en un terremoto fuerte. Este pasa de un comportamiento elástico, muy parecido al teórico o predicho por el método de Nakamura. Pero al aumentar la intensidad del terremoto, con las señales de pulsos energéticos desde la fuente, el suelo es sometido a grandes deformaciones cíclicas. Las grandes deformaciones traen consigo degradación de la rigidez del suelo, aumentando por lo mismo el periodo de vibración del suelo del sitio. Una vez que es superada la fase fuerte del sismo, las deformaciones bajan, lo que reduce nuevamente los periodos.

Entonces es necesario tener en cuenta el periodo degradado del suelo para estudios de amenaza sísmica, ya que estos serán los que estarán presentes para propagar ondas superficiales hacia las estructuras fundadas en ellos.

Las señales que llegan a las estructuras, según sugieren los espectrogramas y odogramas (normal y filtrado), corresponden a ondas superficiales forzadas por señales de la fuente. Para el sismo de El Maule éstas corresponderían a ondas de tipo Love para Concepción Centro y San Pedro de la Paz. Se entiende que esto se debe a su ubicación relativa en dirección y distancia de la asperidad sísmica. Entonces para estudios de amenaza sísmica es necesario describir la fuente sísmica y su ubicación relativa con el sitio para estimar el tipo de onda superficial que la afectará, sea esta onda Love, Rayleigh o una combinación de ellas.



Como se ha indicado en el presente estudio, existe una degradación del suelo que modifica el periodo. Pero también se indica claramente que es necesario hacer trabajos de investigación con metodologías más rigurosas para evaluarlo con precisión.

Referencias

- Archuleta, R.J., Bonilla, L.F. and Lavallee, D. (2000). Nonlinearity in observed and computed accelerograms. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, paper No. 1934
- Arias, A. y Petit Laurent, L. (1965). Un modelo teórico para los acelerogramas de temblores fuertes. *Revista del IDIEM* 4(1), 29-60
- Bonilla, L.F., Tsuda, K., Pulido, N., Régnier, J. and Laurendeau, A. (2011). Nonlinear site response evidence of K-NET and KiK-net records from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space* 63, 785-789
- Bonilla, L.F., Guéguen, P. and Gélis, C. (2021). Contribution of K-NET and KIK-NET data to the monitoring of nonlinear properties of the shallow crust. *6th IASPEI/IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Kyoto, Japan
- Boroschek, R.L., Contreras, V., Kwak, D.Y. and Stewart, J.P. (2012). Strong ground motion attributes of the 2010 M_w 8.8 Maule, Chile, earthquake. *Earthquake Spectra* 28(1), 19-38
- Boroschek, R., Soto, P. y León, R. (2010). Registros del terremoto del Maule $M_w = 8.8$, 27 de febrero de 2010. Informe RENADIC 10/05, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Dobry, R. (1966). Plan de microrregionalización sísmica de Concepción. *Revista del IDIEM* 5(2), 147-149
- IDIEM (2012). Caracterización geotécnica de las estaciones de acelerógrafos de la Universidad de Chile. Santiago, Chile
- Leyton, F. (2019) Comunicación personal.
- NCh433 (1972). Diseño sísmico de edificios. INN, Santiago, Chile
- Poblete, M. y Dobry, R. (1968). Modelo dinámico del subsuelo de Concepción. *Revista del IDIEM* 7(3), 111-136
- Ramos, R. (2021). *Efecto de la directividad del terremoto de El Maule 2010 en el daño de la ciudad de Concepción*. Tesis de Magister, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Ramos, R. and Saragoni, R. (2020). Directivity evidence for the Concepcion city damage in the El Maule, Chile 2010 earthquake. *17th World Conference of Earthquake Engineering*, Sendai, Japan
- Sandoval, M., Saragoni, R. y Ruiz, S. (2016). Periodos y amortiguamientos viscosos del suelo de Concepción estimados de los acelerogramas del terremoto de El Maule, Chile 2010. *IX Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*, Valdivia, Chile
- Saragoni, R. y Ruiz, S. (2012). Implicaciones y nuevos desafíos de diseño sísmico de los acelerogramas del terremoto de 2010. En $M_w = 8.8$ Terremoto en Chile, 27 de febrero 2010. Capítulo 6. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 127-146