

ARTÍCULO

AMPLIFICACIÓN SÍSMICA EN CHILPANCINGO, GUERRERO

*M. en C. Andrés Gama García,
Dr. Alonso Gómez Bernal y
Dr. Jorge Aguirre González*

Amplificación sísmica en Chilpancingo, Guerrero

Resumen

Se presentan resultados sobre estimaciones de los efectos de sitio y la amplificación en Chilpancingo a partir del análisis de acelerogramas de los sismos más intensos registrados en esa ciudad. Los efectos de sitio fueron determinados con dos técnicas diferentes, primero usando la relación espectral entre suelo y roca (FTE), además de la relación espectral horizontal a vertical (H/V). Se encontró que la amplificación más notable en el valle se concentra en un intervalo de 2.0 a 3.0 s. Los resultados sugieren un mayor efecto debido a las irregularidades del subsuelo profundo que a la topografía.

Efectos de sitio, Amplificación sísmica, Efectos locales, Movimiento fuerte del suelo

Seismic amplification in Chilpancingo, Guerrero

Abstract

Seismic amplification effects were determined in the city of Chilpancingo. Site effects and their relationship with the principal directions were analyzed. We used strong ground motion records from the earthquakes with magnitudes ranging between 5 and 8. The site effects were determined using the sediment-to-bedrock spectral ratio (FTE) and the horizontal-to-vertical (HVS) techniques. The result suggests that the amplification in the capital city of Guerrero is to be in the range from 2.0 to 3.0 s. There is evidence of complex site effects in 2D geological configuration.

Site effects, Seismic amplification, Local effects, Strong ground motion.

Introducción

Durante un evento sísmico, las condiciones locales de un sitio, y en menor medida las irregularidades topográficas de la superficie, pueden jugar un papel determinante en los efectos de amplificación del movimiento del suelo y del nivel de la severidad del daño a las construcciones y otros sistemas vitales. En los estudios de Riesgo Sísmico, normalmente se consideran modelos simplificados unidimensionales (1D) para representar el efecto de la propagación de las ondas sísmicas sobre los diferentes sub-estratos de suelo. Sin embargo, a raíz de un gran número de observaciones recientes sobre los efectos de temblores intensos, se ha mostrado que existe una considerable complejidad en la forma en que se presentan los efectos de amplificación (Faccioli, 2003), como consecuencia de una combinación desfavorable de efectos de la fuente, y de la geología del sitio.

Si se quieren estimar con precisión los efectos de amplificación en zonas donde la geología local es compleja, no es suficiente para definir el problema con la escasa información sobre instrumentación sísmica de eventos que han causado daño en esa área, principalmente porque los complejos efectos de sitio tienden a ocurrir en los sub-estratos de suelo más profundos en los valles sedimentarios donde están asentadas las zonas urbanas. Además, el acelerado crecimiento urbano está provocando que los asentamientos humanos se extiendan a las zonas altas o lomeríos, haciendo que el problema sea aún más complejo. Desde el punto de vista de la zonificación del terreno, las fallas de taludes constituyen un peligro inducido que debe ser analizado en algunas ciudades.

Para zonas metropolitanas, como la de Chilpancingo Guerrero, en un estudio de riesgo sísmico, la variabilidad típica del movimiento del terreno y la extensión del área afectada deben tomarse en cuenta en la evaluación del fenómeno de amplificación generado por diferentes fuentes o irregularidades. Así, los efectos de amplificación topográficos son debidos a irregularidades del terreno (lomeríos, pendientes, etc.), las que generan un efecto muy localizado de la amplitud del movimiento. Por otro lado, la amplificación del suelo, es ocasionada por una irregular formación típica del subsuelo, donde los contrastes de impedancia dentro de los estratos del depósito pueden afectar a un área mucho mayor.

En el caso de la amplificación del suelo, la forma en que se lleva a cabo ésta, depende de la forma de la geología local. Se sabe muy bien, que en los estratos de suelo que se extienden horizontalmente con impedancias mecánicas marcadamente menores que el material sobre los que descansan, ocurre un movimiento resonante sísmico respecto a roca o suelo firme, que se manifiesta por picos concentrados en periodos o frecuencias bien tipificados. Sin embargo, en estratos de suelo profundos con notables y complejas interfaces sedimento/base rígida (es decir geometrías 2D o 3D), se ha observado que la amplificación sísmica es mucho mayor que la indicada por modelos 1D.

Los daños históricos debidos a sismos en Chilpancingo, han sido cuantiosos en los dos últimos siglos. Solo se cuenta con información acelerométrica de poco menos de 30 años, en suelo blando y firme. Esta información, aunque escasa, es muy importante para inferir algún patrón de la propagación de las ondas sísmicas que inciden al valle. Se puede estudiar, si existen tendencias en la manera en que se amplifican las ondas sísmicas en el sitio, es decir, si es predominante cierta dirección en particular y si es dependiente del azimut del epicentro; y si este efecto es debido a las condiciones locales o a la topografía. En este trabajo se realiza un análisis de las direcciones principales de Intensidad de los acelerogramas, utilizando el criterio de Arias (1970). Los efectos de sitio se calculan con las funciones de transferencia empíricas y con las relaciones horizontales a verticales (H/V), en diferentes direcciones, con la finalidad de estudiar el efecto de las direcciones sobre los efectos locales.

En la Figura 1 se muestra una vista de la ciudad de Chilpancingo, donde se observa el acelerado crecimiento urbano hacia las partes con pendientes fuertes, se aprecia que el relieve topográfico está formado por una secuencia de lomeríos o colinas con pendiente accidentada. Estas irregularidades topográficas sugieren la posibilidad de un efecto de amplificación de la respuesta sísmica del suelo y un riesgo de deslizamiento sísmico de los taludes de suelo más inestables. Después del sismo de julio de 1957, la ciudad de Chilpancingo no ha experimentado un sismo de gran magnitud a una distancia relativamente cercana (menos de 100 km); esta situación combinada con el acelerado crecimiento urbano hacia las partes más altas del valle, ha aumentado de manera considerable el peligro sísmico ante un escenario de un sismo con magnitud mayor a 8.0 que pueda ocurrir en el Gap de Guerrero. En este estudio se pretende establecer cuál es la participación de cada una de las dos fuentes antes mencionadas que generan la gran amplificación observada en el valle de Chilpancingo, Guerrero.



Figura 1. Condiciones del relieve topográfico y crecimiento urbano que prevalecen en la ciudad de Chilpancingo

Condiciones geológicas y topográficas

La ciudad de Chilpancingo está ubicada en la subprovincia fisiográfica Cordillera Costera del Sur perteneciente a la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur. Chilpancingo se caracteriza por contar con altos relieves del terreno comúnmente formados por roca caliza, ígnea o metamórficas (Formaciones Morelos, Alquitrán y Agua de Obispo), con elevaciones mayores a 2000 msnm. Por otra parte, las sierras bajas y lomeríos se encuentran constituidos por rocas suaves (depósitos del Terciario) fácilmente degradables que producen formas suaves y redondeadas (Formaciones Mezcala y Chilpancingo) con alturas no mayores de 1500 msnm, mientras que los valles se encuentran constituidos por depósitos cuaternarios producto de la erosión de las rocas más antiguas localizadas en las partes altas. El valle de Chilpancingo se caracteriza por ser una estructura colapsada.

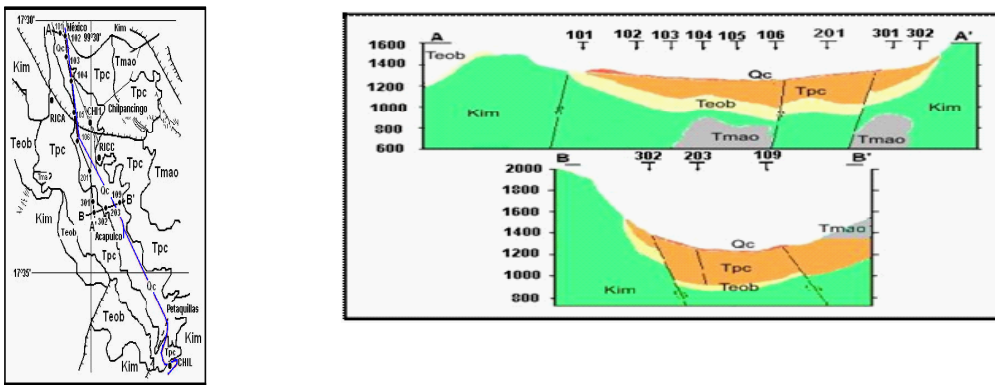


Figura 2. Mapa geológico del valle de Chilpancingo. Secciones geológicas del subsuelo según GEOSERVICIOS (1988)

En la Figura 2 se presenta el mapa geológico del valle de Chilpancingo, se incluye la ubicación de las estaciones acelerométricas, CHI1, CHIL, RICA y RICCA. También se incluyen secciones geológicas en el sentido longitudinal y transversal del valle de Chilpancingo (GEOSERVICIOS, 1988), las cuales presentan una idea de los espesores de suelo no consolidado (Formaciones Qc, Tpc y Teob) de más de 350 m, que descansa en suelo firme (Formación Kim). Además se indican las fallas locales identificadas que están produciendo movimientos del suelo importantes.

Con el propósito de tener una visión más completa del relieve topográfico y del crecimiento urbano en el valle de Chilpancingo, en la Figura 3 se presenta la topografía regional y la correspondiente área urbana, proporcionada por INEGI (2009). Como se puede apreciar, la zona urbana de la ciudad de Chilpancingo se localiza en un valle rodeado por una topografía bastante irregular.

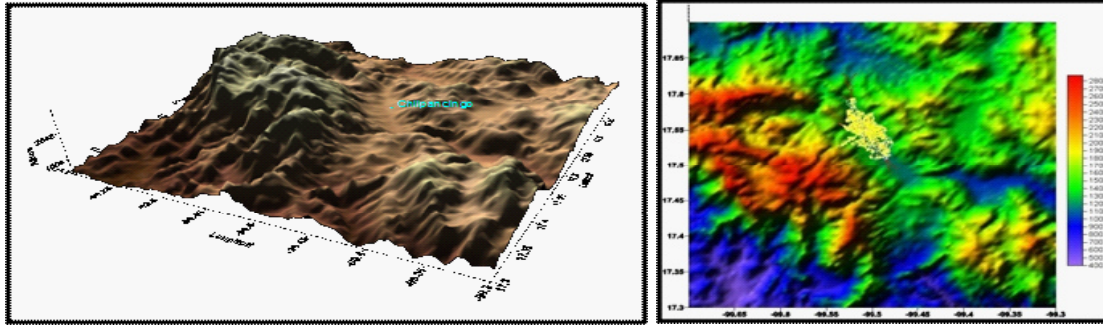


Figura 3 Mapa topográfico y límites del área urbana

Sismos utilizados en este estudio

La localización de las estaciones acelerográficas que han registrado temblores en el valle de Chilpancingo se pueden ver en la Figura 2. Después del sismo de 1985, dejó de operar la estación CHI1, pero se instalaron y han estado en funcionamiento tres aparatos en todo el valle de Chilpancingo; CHIL, una estación en suelo firme; y RICC y RICA, dos estaciones sobre estratos compresibles. Actualmente se cuenta con bastante información acelerográfica, sin embargo existen pocos movimientos moderados que han generado aceleraciones significativas.

Para estudiar los efectos de amplificación se aplicaron dos técnicas. La primera es la relación espectral horizontal a vertical, H/V o HVSR; la otra, la relación espectral suelo a roca, o función de transferencia empírica (FTE). Se seleccionaron los eventos que se registraron simultáneamente en terreno compresible (RICC) y en terreno firme (CHIL). Estos son los sismos de la Tabla 1, los cuales se usaron para la estimación de las funciones de transferencia y para las relaciones espectrales. En la figura 4 se presenta la localización de los epicentros de estos diez eventos (ver Tabla 1, para claves), donde se puede apreciar la distancia relativa a la ciudad y su azimut.

Tabla 1. Sismos registrados en el suelo sedimentario de Chilpancingo

Fecha	*	Magnitud (M _w)	Dist.epic. (km)	Prof. (km)	PGA _H (g)	PGA _V (g)	PGA _w /PGA _H	PGV _H (cm/s)	PGV _V (cm/s)	PGV _w /PGV _H	Estación	Mec
29/10/94	A	5.1	77	49	0.0130	0.0110	0.81				RICC	IAP
10/12/94	B	6.4	233	54	0.0350	0.0150	0.43	4.89	2.20	0.41	RICC	IAP
14/09/95	C	7.4	138	22	0.0880	0.0570	0.65	11.55	8.01	0.69	RICC	IEP
15/07/96	D	6.8	162	22	0.0259	0.0173	0.67	3.28	2.08	0.63	RICC	IEP
11/01/97	E	7.2	367	40	0.0305	0.0129	0.42	4.31	2.30	0.53	RICC	IAP
22/05/97	F	6.5	265	56	0.0166	0.0092	0.55	1.77	1.15	0.65	RICC	IAP
15/06/99	G	7.0	234	69	0.1017	0.0607	0.60	7.83	4.68	0.60	RICC	IAP
21/07/00	H	5.9	115	80	0.1267	0.0526	0.42	5.53	2.2	0.40	RICC	IAP
21/01/03	I	7.5	524	23	0.0275	0.0230	0.84	7.05	2.88	0.41	RICC	IEP
13/04/07	J	6.0	70	42	0.0460	0.0321	0.72	7.77	2.46	0.32	RICC	IEP

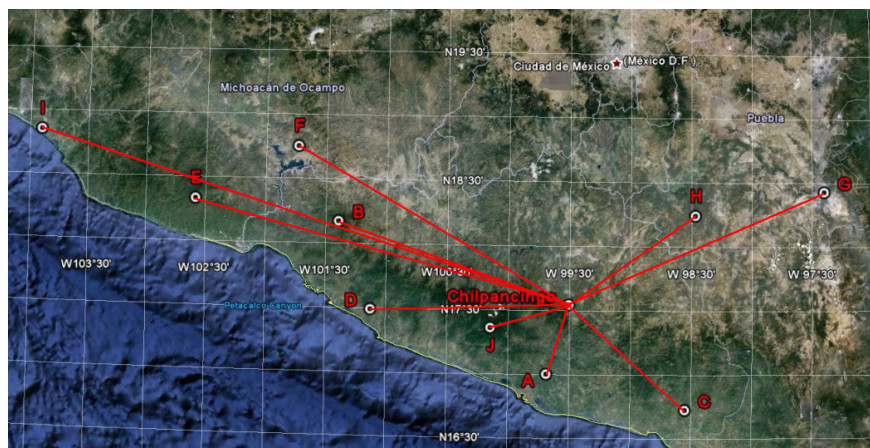


Figura 4. Mapa de localización de los epicentros de los sismos más intensos

Efectos de sitio observados a partir de acelerogramas

El acelerograma captado durante el 19 de septiembre de 1985 por la estación CHI1, es actualmente el registro más significativo de Chilpancingo. El aparato se ubicaba en el centro de la ciudad, donde el subsuelo incluye depósitos superficiales de arcilla. El terremoto corresponde a un evento de magnitud muy alta ($M_s=8.1$), a pesar de la lejanía del epicentro, más de 300 km, se registraron aceleraciones muy elevadas, de más de 200 cm/s^2 (0.20 g) en la componente horizontal y más de 80 cm/s^2 en la vertical (0.08 g), siendo mayores que las registradas en la Ciudad de México; también son significativas las ordenadas espectrales que muestran varios máximos, entre 0.5 y 1.0 seg, incluyendo uno muy notable en 2 s de periodo (Figura 5), donde además, como referencia, se comparan con los respectivos espectros del acelerograma SCT. En este registro es bastante notable el nivel de aceleraciones que se midió para este evento tan lejano, ya que no se conocía cuál podría ser la magnitud de la amplificación del movimiento del suelo en esta ciudad, a pesar de que existía evidencia de daños severos causados por otros terremotos, como el del año de 1957.

A raíz del registro del temblor de 1985 creció la inquietud por conocer más el mecanismo de amplificación del movimiento del suelo en el valle de Chilpancingo, se ha especulado sobre el efecto que causaría en la actualidad un terremoto con magnitud similar al de 1985 pero con epicentro más cercano, o bien otro evento similar al sismo de julio de 1957. Es importante remarcar que gran parte de la energía se concentró en una banda de frecuencias alrededor de 0.50 Hz (2.0 s). Además, un análisis detallado de los acelerogramas en CHI1 indica que las frecuencias de 0.50 Hz existen durante todo el registro, lo que indica que las ondas sísmicas de periodo de 2 s prevalecen durante todo el registro; de acuerdo a los espectros de respuesta las ordenadas más altas se ubican entre 0.5 a 1.2 s.

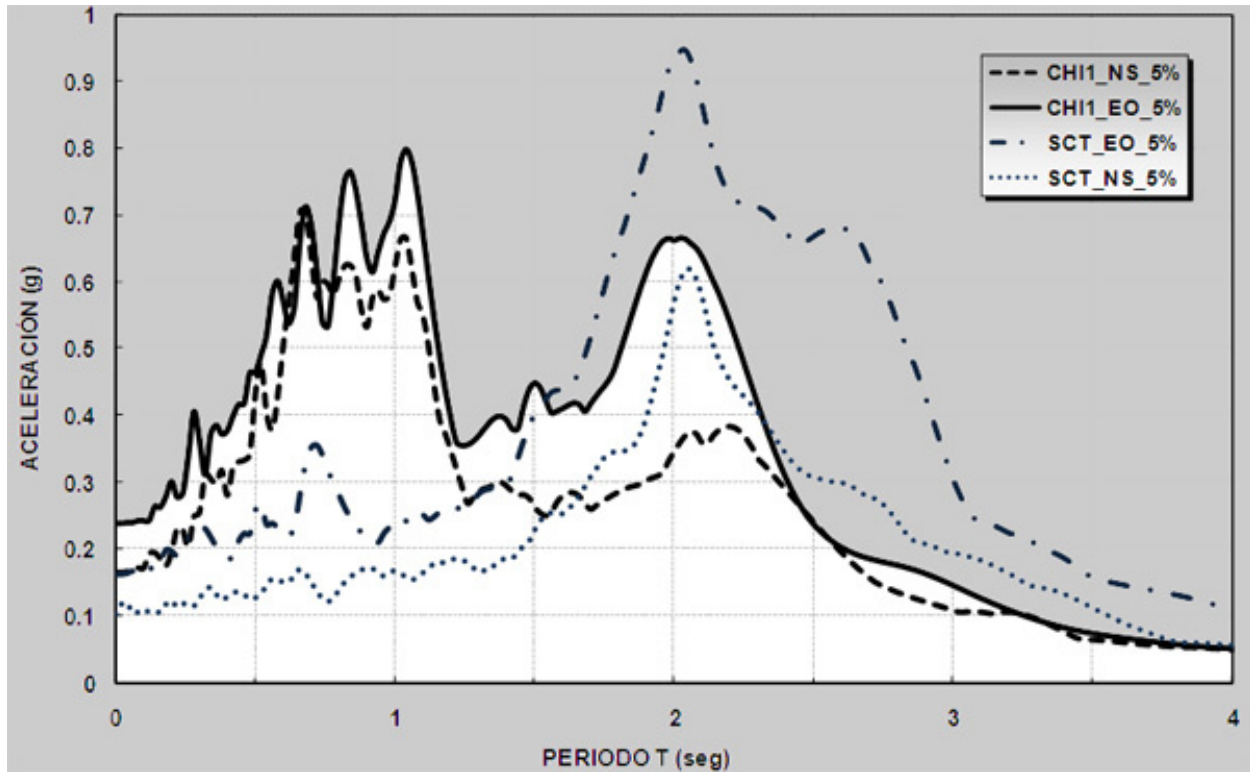


Figura 5. Espectros de respuesta elástica (2%) del sismo del 19/09/1985 observados en CHI1 (Chilpancingo) y SCT (Ciudad de México).

Relaciones espectrales H/V

Existen varios métodos que utilizan como base las observaciones simultáneas de microtemblores; por ejemplo, Nakamura (1989) utilizó la relación espectral Horizontal a Vertical (HVSr) para determinar los periodos dominantes; otros investigadores han aplicado una técnica basada en la inversión de la relación H/V con la que es posible estimar la variación de la velocidad de ondas de cortante, como Arai y Tokimatsu (2004). Aunque este procedimiento ha sido cuestionado por su falta de fundamento teórico (ver por ejemplo, Horike et al., 2001), en la actualidad su aplicación se ha extendido en todas partes, y se utiliza como una herramienta muy versátil para estimar las características del sitio donde se localiza la estación sismográfica o acelerográfica (ver p.e. Lozano et al., 2009). Este método también se ha aplicado para estudiar los acelerogramas de movimiento intenso.

En el caso de Chilpancingo se usaron los registros de los ocho sismos más intensos registrados en los últimos 15 años en la estación RICC, la cual se encuentra en la Unidad Académica de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAG), la cual se ubica sobre el suelo blando del valle de Chilpancingo. Estos sismos se indican en la Figura 4 y Tabla 1. Los resultados de calcular los cocientes espectrales H/V, en RICC, estación ubicada en suelo blando, y en CHIL, estación sobre roca, se muestran en la Figura 6. En cada caso, se presentan las gráficas promedio de los nueve sismos con + la desviación estándar, para las componentes Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EO). Al analizar los resultados, se observa que en el caso de suelo sedimentario (RICC), el pico más importante en NS se presenta aproximadamente en el periodo de 2.7 s, con un cociente de 5, mientras que en la dirección EO el máximo es de 4 y se concentra en el periodo de 2.5 s. En el caso de la estación sobre roca (CHIL), se observa un comportamiento típico de un terreno de suelo firme, es decir, una curva muy horizontal (excepto entre 0 y 0.7 s), como en el caso anterior, la componente NS es un poco mayor que la EO.

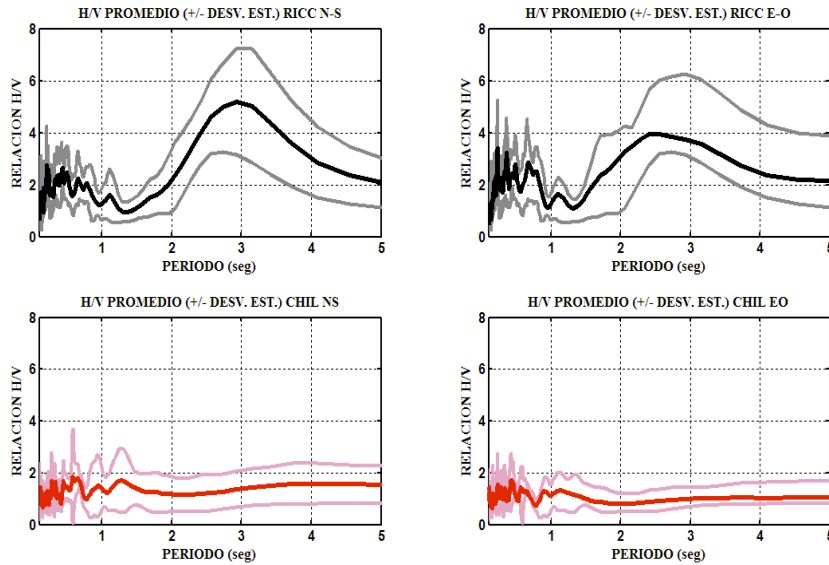


Figura 6. Promedios de los Cocientes Espectrales + la desviación estándar, de los nueve sismos más intensos registrados en Chilpancingo en los últimos 15 años en RICC y CHIL.

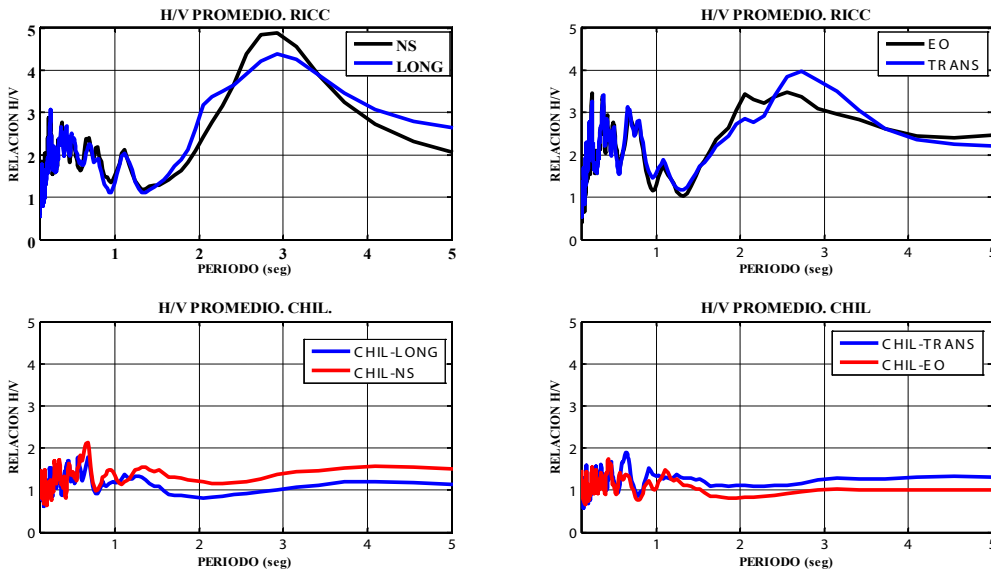


Figura 7. Comparación de los Cocientes Espectrales Promedio. Con y sin rotación de los ejes

En la Figura 7 se muestran además, las gráficas de las componentes horizontales actuando a 46° de las registradas, estas direcciones están alineadas aproximadamente con el eje longitudinal (LONG) y transversal (TRANSV) del valle, y se ha detectado cierta direccionalidad de la energía sísmica en estos ejes. Al usar los registros a 46° en la dirección LONG y en la TRAN, se detecta que las curvas de estas componentes giradas tienden al mismo periodo (2.7 s) y a la misma amplitud. Esto mismo se observa en RICC, es decir, al trabajar con las componentes giradas a 46 grados, tienden a ser similares y cercanas a la unidad.

Funciones de transferencia empíricas

Los espectros de Fourier de las componentes verticales y horizontales de los acelerogramas de los nueve eventos más importantes registrados simultáneamente en CHIL y RICC se usaron para obtener las relaciones espectrales o funciones de transferencia empíricas (FTE) entre estos dos sitios. En la Figura 8 se muestran los promedios aritméticos de esos cocientes para cada una de las 3 direcciones (FTE-NS, FTE-EO y FTE.VR). Las curvas horizontales (FTE-NS y FTE-EO) muestran que en general existe cierta coincidencia en las formas y en el nivel de magnitud de sus amplitudes, entre este grupo de nueve sismos de magnitud intermedia, y las observadas en el terremoto de 1985. Se observan tres máximos importantes bien definidos en las componentes horizontales, el primero entre 0.35 y 0.45 s, el segundo entre 0.7 y 1.3 s y el tercero entre 1.9 y 2.5 s. Sin embargo, al analizar cada componente horizontal se observa que en la dirección NS la amplificación del tercer máximo, del orden de 17, está alrededor del periodo de 2.5 s; mientras que en la componente EO, es del orden de 25 y se detecta en el periodo de 2.0 s. En cuanto a la componente vertical existen máximos importantes concentrados entre 0.7 y 1.3 s, pero no se detectan picos muy notables entre 1.9 y 2.5 s como los observados en el sismo de 1985.

Funciones de Transferencia Únicas

Dada la gran diferencia en amplitud y forma entre las componentes NS y EO, es posible definir una FTE observada independiente de la dirección, es decir, se puede usar solo una resultante de los espectros de Fourier de las componentes horizontales. Esta relación única se puede establecer de acuerdo a Huang (1983) como:

$$(1) |F_x(f)|^2 + |F_y(f)|^2 = cte(f)$$

donde $|F_x(f)|$ y $|F_y(f)|$, son los espectros de amplitud de Fourier de los ejes perpendiculares x y y. La ecuación (1), indica que la potencia total es una cantidad invariante de la orientación de los ejes de registro. Se puede definir una amplitud de Fourier promedio como:

$$(2) |F(f)| = \sqrt{(|F_x(f)|^2 + |F_y(f)|^2) / 2}$$

Para representar el espectro de amplitud de Fourier en todas las direcciones horizontales. Desde luego que este promedio no es el promedio aritmético de $|F_x(f)|$ y $|F_y(f)|$. Y los cocientes espectrales se pueden definir como:

$$(3) E_a(f) = \frac{|F(f)|_{RICC}}{|F(f)|_{CHIL}}$$

El cociente espectral, $E_a(f)$ se puede interpretar como la raíz cuadrada de la relación del espectro de potencia total de RICC dividido por el espectro de potencia total en CHIL, es decir, representa la suma vectorial o resultante única de los espectros de amplitud. Esta relación de amplitud observada promedio (FTE-RU), se calculó para los acelerogramas de los nueve sismos estudiados; y en la Figura 8 se compara este promedio con los promedios de las componentes FTE-NS y FTE-EO.

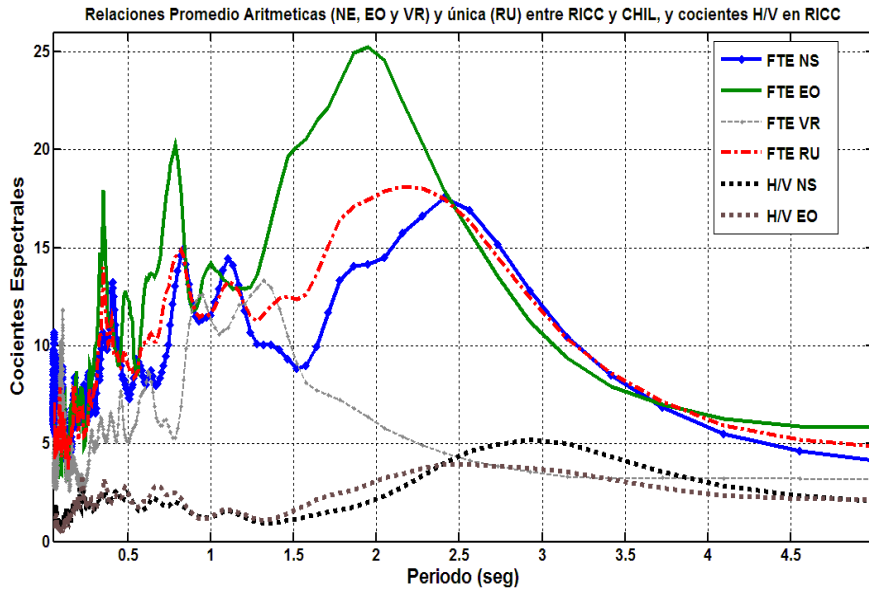


Figura 8. Funciones de transferencia empíricas observadas (FTE) de cada dirección para los nueve sismos estudiados; se comparan con la FTE de relación única. Se incluyen además los cocientes H/V.

Conclusiones

De las características de las funciones de transferencia observadas entre RICC y CHIL, mostradas en la Figura 8 se deduce que las FTE observadas son diferentes para las dos direcciones horizontales (NS y EO) tanto en amplitud como en periodo; aunque las características del origen del sismo y del trayecto tienen influencia en la forma, están bien definidos los periodos en cada dirección donde se presentan las amplificaciones más altas, como se puede constatar en las Figura 8. Esta situación indica una fuerte polarización del movimiento del suelo que es independiente de las características del temblor, y que es causada por la fuerte irregularidad de la geología local tridimensional, esto es bastante notorio sobre todo en periodos mayores a 1 s. Por lo tanto los modelo 1D de propagación vertical de ondas de cortante no pueden predecir con precisión en este sitio la diferencia entre las funciones de transferencia de componentes individuales, como se puede deducir de la Figura 8.

Por otra parte, cuando se comparan los cocientes FTE y los cocientes H/V en RICC, se concluye que, en cuanto a amplificaciones, los cocientes H/V alcanzan valores relativamente muy bajos, de no más de 5, esto representa entre 3 y 5 veces menos que las funciones de transferencia FT entre RICC Y CHIL. Pero al comparar los valores de los periodos donde se concentran los máximos, éstos se presentan en intervalos muy cercanos para las dos técnicas, sobre todo en la componente NS, donde los valores están entre 2.7 y 2.8 s. Esto muestra que la técnica H/VSR nos puede indicar con bastante precisión el periodo de los estratos del subsuelo, pero no tiene la capacidad de estimar el orden de amplificación respecto a terreno firme. Al usar la técnica H/V o H/VSR, se observó que cuando se consideran las componentes de las direcciones principales de los registros (LONG y TRANS), las curvas tienden a ser iguales en amplitud y periodo.

Un resultado muy importante que muestra claramente la complejidad de la geología local y de la topografía en los efectos de sitio es la gran diferencia observada entre las funciones de transferencia NS y EO, lo que demuestra que no es posible reproducir completamente con un modelo 1D los efectos de amplificación del valle de Chilpancingo. Por lo tanto, si se quieren estimar con precisión los efectos de amplificación es necesario recurrir a modelos 2D o 3D del valle y así tratar de explicar las diferencias significativas de las

funciones de transferencia empíricas promedio horizontales observadas entre las estaciones RICC/CHIL.

Bibliografía

Faccioli E., Vanini M., y Frassinetti L. (2002), "“Complex” site effects in earthquake ground motion, including topography", Proceedings 12th European Conference on Earthquake Engineering, paper 844.

Geli L., Bard P. Y., Jullien B. " The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results" Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 78, pp. 42-63.

Gómez Bernal A., Juárez García H., y Corona M. (1999), "Peligro sísmico en el valle de Chilpancingo, Guerrero", Memorias XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, vol. 1, Morelia Michoacán, México.

Huang, M. J. (1983). "Investigation of local geology effects on strong earthquake ground motions", reporte CALTECH, EERL 83-03, Pasadena California.

Kramer S. (1996) "Geotechnical Earthquake engineering". Ed. Prentice Hall.

Lozano L., Herraiz M. Singh S. K. (2009) "Site effect study in central Mexico using H/V and SSR techniques: Independence of seismic site effects on source characteristics", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol 29, pp. 504-516.

Moya A., Schmidt V., Segura C., Boschini I., y Atakan K. (2000) "Empirical evaluation of site effects in the metropolitan area of San José, Costa Rica." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 20, pp. 177-185.

Riddell R. (2007), "On Ground Motion Intensity Indices", Earthquake Spectra, Vol. 23, No. 1, pp. 147-173

