



XVIII Congreso Peruano de Geología

MICROZONIFICACIÓN Y ESCENARIOS SISMICOS PARA LA CIUDAD DE SANTA TECLA, EL SALVADOR.

Javier Francisco Lermo-Samaniego¹, Benancio Henríquez-Miranda², José Martínez-González¹
Hugo Fuentes³, Cesar Wilfredo², Elías Alexis Arroyo², Cristian Mirón²

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, DF, México jlermos@iingen.unam.mx

² Facultad Multidisciplinaria De Occidente, Departamento de Física, Universidad de El Salvador

³ Protección Civil del Gobierno de Santa Tecla, El Salvador

1. Introducción

La ciudad de Santa Tecla forma parte de la Zona Metropolitana de la ciudad capital Del Salvador. Esta región del país se localiza dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico; sobre la placa del Caribe que está en colisión con la placa de Cocos. Esta ciudad se encuentra en una zona de importante peligro sísmico, pues se ve afectada por sismos originados en la zona de subducción y sismos locales con profundidades superficiales (< 15 Km). Este tipo de sismos han provocado el deslizamiento de tierras como el ocurrido el 13 de enero de 2001, que dejó 687 viviendas soterradas y una importante cantidad de personas fallecidas y pérdidas materiales considerables. En la actualidad, esta ciudad carece de un reglamento de construcción para diseño por sismo, así como de un mapa de peligro volcánico y por deslizamiento. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de sitio en la ciudad de Santa Tecla, a partir del análisis de microtemores mediante la técnica de Nakamura (HVNR), para elaborar un mapa de microzonificación sísmica de la región a partir de la forma espectral del cociente HVNR, datos geotécnicos, geomorfología, geología e hidrología. Así mismo se estimaron las aceleraciones del terreno para dos sismos de diferentes fuentes, subducción ($M_w 7.7$) y local ($M_w 6.6$).

2. Resultados de la Investigación

En este trabajo se evaluó la respuesta sísmica del suelo en 99 sitios de Santa Tecla, mediante la técnica de los cocientes espectrales HVNR (Lermo y Chávez-García, 1994). Las mediciones fueron distribuidas de tal manera que se cubriera la mayor superficie de la ciudad. Los sitios estudiados se muestran en la Figura 1 con puntos color

rojo. Para la adquisición del ruido sísmico se emplearon sismógrafos de banda ancha Guralp modelo 6TD, configurados a 100 mps. Esta información complementó los trabajos realizados por Reyes y Sorto (2007) y por la Norwegian Seismic Array (NORSAR) en 2008 (Figura 1, puntos color azul).

Los cocientes espectrales fueron agrupados siguiendo la metodología de las familias espectrales (Limaymanta, 2008), con el fin de definir un número razonable de microzonas. Este criterio toma en consideración la forma del espectro HVNR, la frecuencia fundamental y la amplificación. En consecuencia, se puede decir que la forma espectral de las familias obtenidas, describe el comportamiento dinámico de los diferentes paquetes estratigráficos.

Con base en lo anterior, la ciudad de Santa Tecla se clasificó en tres tipos de terrenos sísmicos, que a su vez se subdividen en otras categorías (figura 1). A partir de esto se interpretó un modelo estratigráfico para la ciudad, que fue sustentado con información geológica del Pozo 01 (Alcandía, 1980). En la Figura 2 se muestra con líneas rojas la orientación de los dos perfiles geotécnicos, así como una interpretación en la figura 3.

2.1. Región Norte o Volcánica.

Esta región se muestra con un color amarillo en la figura 1. La cual esta conforma por distintos materiales eyectados del volcán El Boquerón: como tobas, ceniza volcánica y derrames de roca. Como se observa en los cocientes espectrales de la figura 2a, el suelo en esta región en general, presenta un efecto de sitio menor a 3 veces de amplificación relativa entre 0.5 a 5 Hz (curva de color rojo), sin embargo en algunos sitios su amplificación de estos suelos, cuando se presente un sismo, pueden llegar hasta

más de tres veces, esto es, si observamos las curvas individuales de la gráfica mencionada. Se espera que edificios mayores a los 4 pisos de esta zona estén mejor construidos, o los futuros tengan una mejor regulación.

2.2. Región Centro.

Subdivida a su vez en 4 sub zonas:

2.2.1. Zona B1

Representada con un color negro en la figura 1; cuyos suelos son competentes, ya que en general las curvas de los cocientes espectral no rebasa las dos veces de amplitud en el intervalo de frecuencias 1.0 - 50 Hz (figura 2b, zona B1). Este comportamiento es propio de una estratigrafía compuesta por una serie de estratos rocosos competentes (figura 3);

2.2.2. Zona B2

Zonas identificadas con un color blanco en la figura 1. Estas zonas se localizan en lugares identificados como de inundación, cerca de barrancas. Estas zonas, presentan un efecto de sitio que se localiza claramente entre 5 a 15 Hz, cuya amplificación relativa llega hasta 4 veces, como se puede observar en la gráfica de la figura 2b (zona B2). Esta zona es la de mayor vulnerabilidad para construcciones entre 1 y 2 pisos, por lo que sería bueno revisarlas estructuralmente y mejorar su normatividad;

2.2.3. Zona B3

Zonas identificadas con un color gris claro en la figura 1. Estas zonas se localizan también en lugares identificados como de inundación. Estas zonas, presentan un efecto de sitio que se localiza claramente entre 3 a 6 Hz, cuya amplificación relativa también llega hasta 4 veces, como se puede observar en la gráfica de la Figura 2b (Zona B3). Esta zona es la de mayor vulnerabilidad para construcciones entre 2 y 4 pisos, por lo que sería bueno revisarlas estructuralmente y mejorar su normatividad;

2.2.4. Zona B4

Zonas identificadas con un color gris oscuro en la figura 1. Estas zonas, presentan un efecto de sitio que se localiza claramente alrededor de 2 Hz, cuya amplificación relativa llega hasta 3 veces, como se puede observar en la gráfica de la Figura 2b (zona B4). Esta zona es la de mayor vulnerabilidad para construcciones de 5 pisos, por lo que sería bueno revisarlas estructuralmente y mejorar su normatividad.

2.3 Región Sur o De Laderas

Esta zona se ubica al sur de la ciudad y consta de depósitos de suelo transportado, zonas de inestabilidad de laderas (*creep*) y depósitos de roca. Esta región también se subdividió en dos zonas.

2.3.1. Zona C1

Zona identificada con un color rosa en la figura 1. Cuyos cocientes espectrales presentan un comportamiento anómalo entre las frecuencias 0.5 a 6 Hz, como se puede observar en la figura 2c (zona C1);

2.3.2. Zona C2

Zona identificada con un color verde en la figura 1 (zona donde ocurrió el deslizamiento del 2001). Esta zona solo presenta un comportamiento anómalo hacia bajas frecuencias (0.5- 1.0 Hz), como se puede observar en la figura 2c (zona C2).

Con el objeto de definir su grado de peligrosidad de estas dos zonas, se ha recurrido a un estudio científico, realizado después del evento del 2001, que utilizo también los microtremors para caracterizar estas zonas. Ellos mencionan lo siguiente *“En general, las mediciones de amplificación in situ han evidenciado picos de amplitud superior a 4 veces en frecuencias alrededor de 1 Hz, lo que demuestran la existencia del fenómenos de amplificación local; además, una justificación parcial del colapso de la ladera se puede encontrar en las características del terremoto que presenta, alrededor de 1 Hz, un contenido energético del registro acelerométrico del terremoto del 13 de enero de 2001 significativamente alto y una duración de las fases de amplitud elevada (ondas S) bastante larga y propia de los terremotos de tan alta magnitud”* (Consortio C. Lotti - Enel.Hydro, 2001).

De estas premisas, se puede concluir que la zona C1 (figura 1, color rosa), presenta mayor vulnerabilidad por presentar efectos de sitio precisamente alrededor de 1 Hz.

Los cocientes espectrales fueron utilizados como “seudo-Funciones de Transferencia Empíricas (s-FTE)” (Martínez-González, 2015) y empleados para el cálculo de acelerogramas sintéticos por medio de la Teoría de Vibraciones Aleatorias (Cartwright y Longuet-Higgins, 1956). Para inferir el movimiento en la ciudad, se utilizaron los acelerogramas registrados en la estación acelerográfica del Hospital San Rafael de la Ciudad de Santa Tecla (HSFR) (cuadro azul, figura 1). Sin embargo, esta estación sísmica presenta un importante efecto de sitio. Para evaluar la amplificación local, se empleó la relación espectral para movimientos fuertes HVSR (Lermo y Chávez-García, 1993), para los sismos del 13 de enero y 13 de febrero de 2001. Para esto se consideró que las señales sísmicas son un campo difuso (Sanchez-Sesma *et al.*, 2011), por lo que se calcularon las densidades espectrales de cada componente. Posteriormente se realizó un *stacking* de estos espectros obtenidos. Una vez ponderadas las energías, se realizó el cociente espectral. El cociente HVSR calculado se presenta en la gráfica de la figura 2d (HSFR). Posteriormente, se corrigieron los sismos anteriormente señalados en el dominio de las frecuencias, mediante la deconvolución para estimar el movimiento sísmico en la base del terreno carente de amplificación local. A partir de los registros corregidos, se estimó el movimiento del terreno para los 99 sitios. De estos se calcularon los espectros de respuesta en seudo-aceleración al 5% de amortiguamiento. En la Figura 4 y 5 se presentan dos escenarios de terremoto para un sismo de subducción M_w 7.7 y local M_w 6.6, para periodos estructurales de 0.1 y 0.3 segundos.

3. Conclusiones

Se realizó la microzonificación sísmica de la ciudad de Santa Tecla a partir de mediciones de ruido sísmico. La

ciudad se clasificó en 3 tipos de terrenos sísmicos, caracterizados por su respuesta dinámica del suelo y su vulnerabilidad. Se ocuparon los cocientes HVNR como pseudo-funciones de transferencia empírica para la obtención de sismogramas sintéticos. Se observaron importantes valores de aceleración para periodos estructurales de 0.1 a 0.3 segundos para los terremotos del 2001 (M_w 7.7 y M_w 6.6), respectivamente. Los mapas de intensidades sísmicas confirman la gran vulnerabilidad sísmica para las zonas A, B2, B3 y C1.

5. Referencias

- Cartwright De., Longuet-Higgins MS. The statistical distribution of the maxima of a random function. Proc. Roy. Soc. London Series A (Mathematics and Physical Science) 1956; 237:212-32.
- Consortio C. Lotti - Enel.Hydro (2001). Investigación Geotécnica Integral en La Cordillera El Balsamo, Al Sur de Santa Tecla, entre las Colonias Las Delicias y Las Colinas, Informe Ejecutivo para el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Apoyo de FOSEP y BID, paginas 23.
- Lermo, J., y Chávez-García, F.J. (1993). Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios with Only One Station, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **83:5**, 1574-1594.
- Lermo, J., y Chávez-García, F.J. (1994). Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84:5**, 1350-1364.
- Martínez-Gonzalez, JA. (2015). Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtremores, para fines de mapas sísmicos de intensidad. *Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM*.
- Pozo 1, Colonia Quezaltepec, Santa Tecla (1980). Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San Salvador, El Salvador. C. A.
- Sánchez-Sesma, F., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M. and Rodríguez-Castellanos, A. (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophys. J. Int.* **186**, 221-225.
- Limaymanta-Mendoza, FM. (2009). Uso de familias espectrales obtenidas con registros de sismos y microtremores para la clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico. Aplicación. *Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM*.

4. Agradecimientos

Esta investigación fue posible por el apoyo económico del Ministerio de Educación de El Salvador (MINED) y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. El primero gracias al proyecto "Fortalecimiento de las competencias académicas y de investigación de los docentes del Departamento de Física de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente en Riesgo Sísmico".

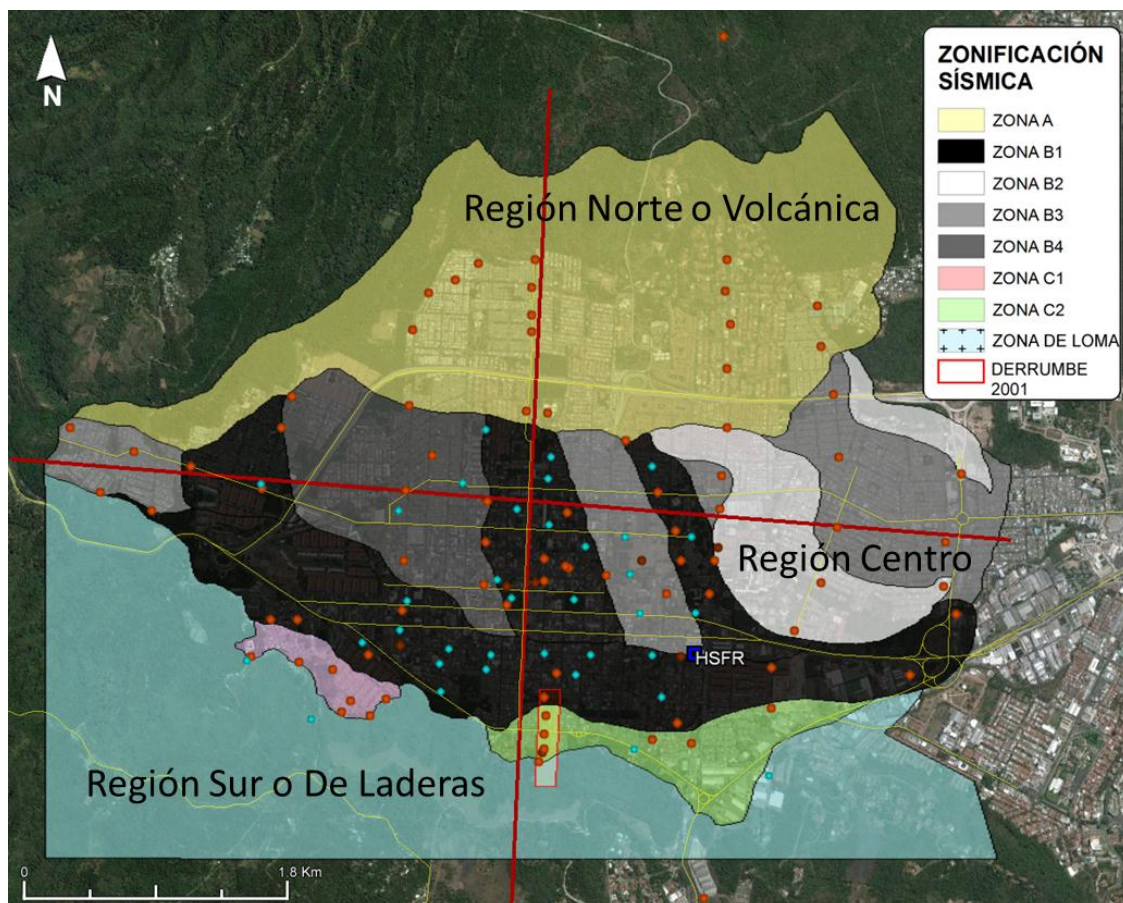


Figura 1. Clasificación de tipos de terreno para diseño sísmico propuesto para la ciudad de Santa Tecla. Mediciones de microtremors este estudio (puntos color rojo), trabajos previos (puntos color azul). Líneas rojas indican perfiles N-S y EW de la figura 3.

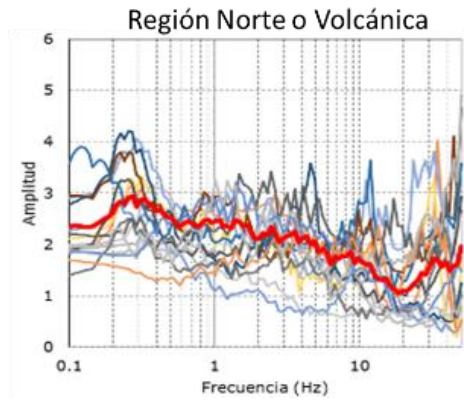


Figura 2a. Familia espectral para la Región Norte o Volcánica. Líneas delgadas de colores, cocientes espectrales individuales (HVNR). Línea gruesa de color rojo, promedio de las HVNR.

Región Sur o De Laderas

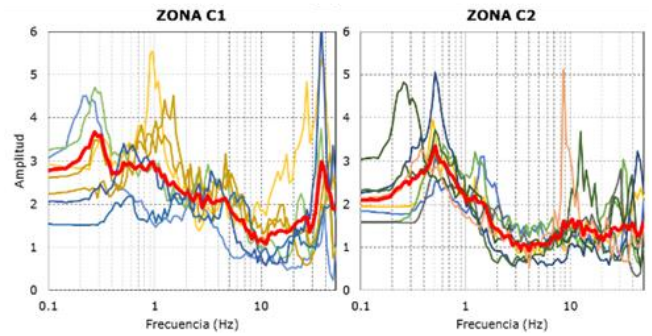


Figura 2c. Familias espectrales para la Región Sur o De Laderas. Líneas delgadas de colores, cocientes espectrales individuales (HVNR). Líneas gruesas de color rojo, promedio de las HVNR.

Región Centro

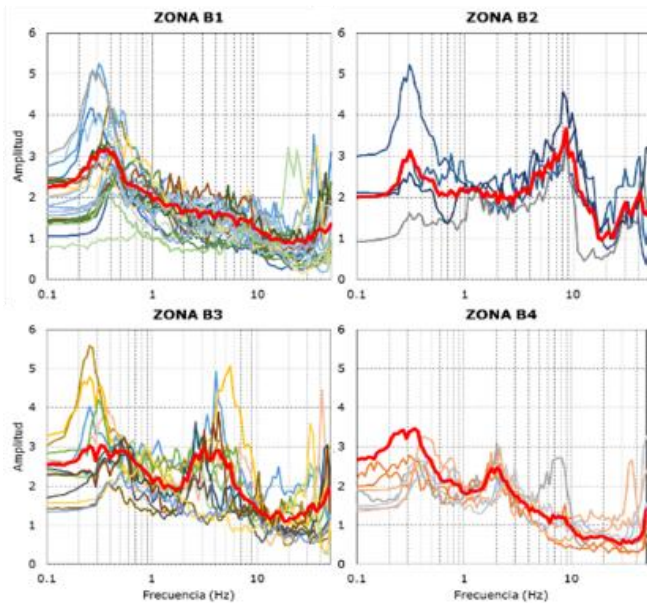


Figura 2b. Familias espectrales para la Región Centro. Líneas delgadas de colores, cocientes espectrales individuales (HVNR). Líneas gruesas de color rojo, promedio de las HVNR.

HSRF

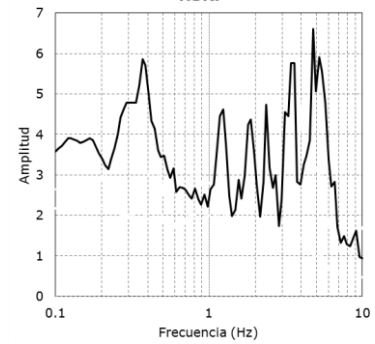


Figura 2d. Efecto de sitio para la estación acelerográfica ubicada en el Hospital San Rafael (HSRF). Línea negra continua HVSR promedio, obtenido con sismos (HVSR).

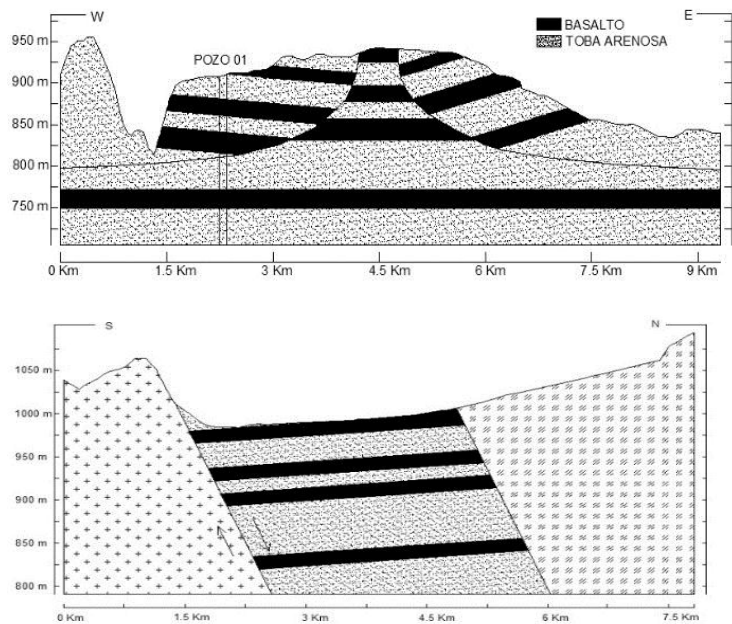


Figura 3. Parte superior, perfil WE con interpretación estratigráfica. Parte inferior, perfil SN, con la interpretación estratigráfica.

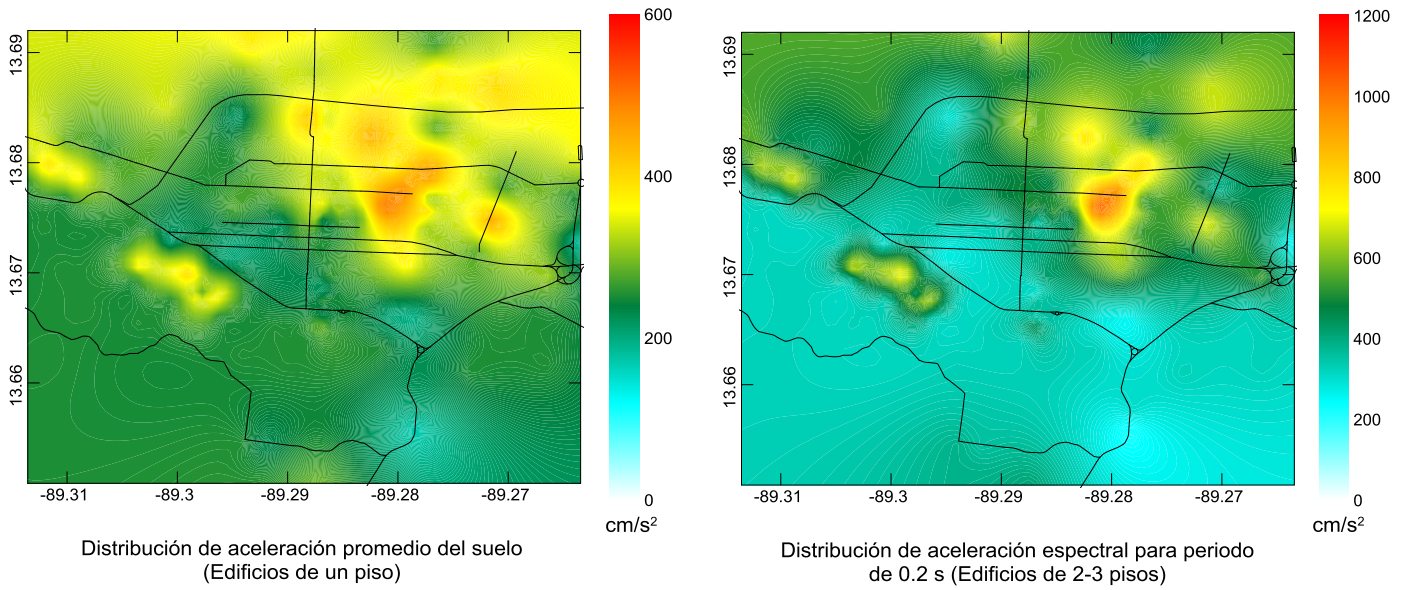


Figura 4. Mapas de intensidades sísmicas calculadas para diferentes periodos estructurales, para el sismo del 13 de enero de 2001, M_w 7.7 tipo subducción. Escala en cm/s^2 .

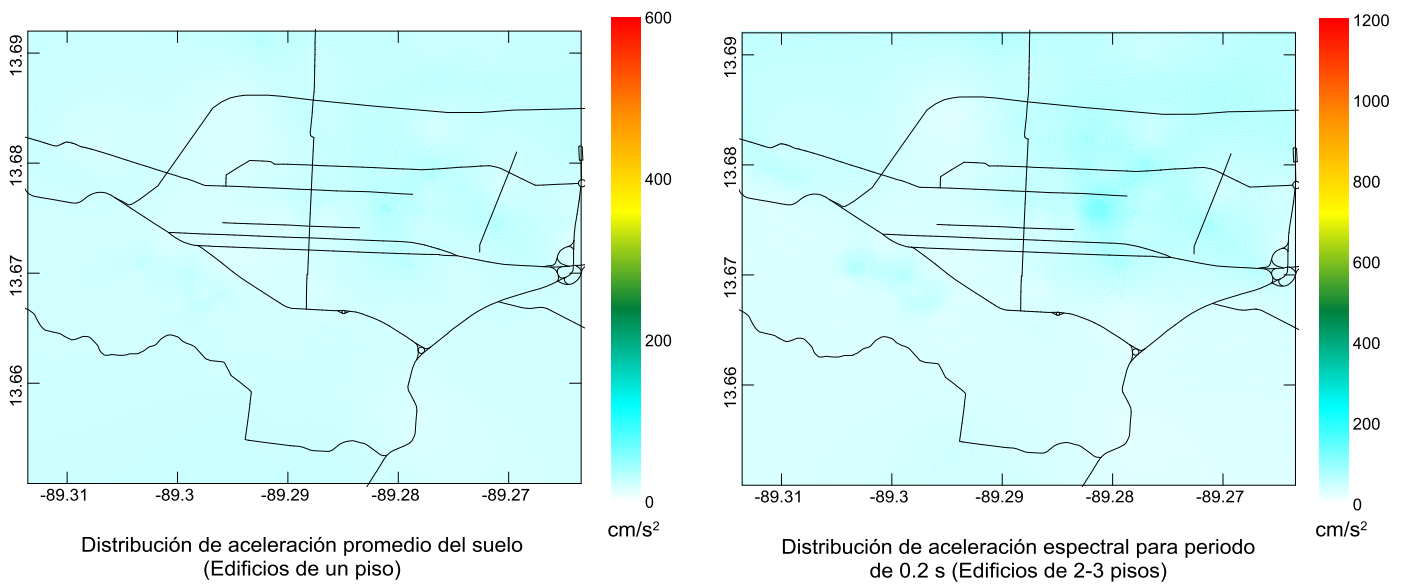


Figura 5. Mapas de intensidades sísmicas calculadas para diferentes periodos estructurales, para el sismo del 13 de febrero de 2001, M_w 6.6 tipo subducción. Escala en cm/s^2 .