

## La estructura de velocidades y su relación con el peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

**Raúl González-Herrera<sup>1,2\*</sup>, Juan Carlos Mora-Chaparro<sup>3</sup>, Jorge Aguirre-González<sup>4</sup> y David Alberto Novelo-Casanova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Ciudad Universitaria, Libramiento Norte Poniente, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

<sup>2</sup> Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.

<sup>3</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F.

<sup>4</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F.

\*ingeraul@yahoo.com

### RESUMEN

*La estructura del subsuelo del valle de Tuxtla Gutiérrez ha sido motivo de interés debido a que se han registrado daños estructurales ocasionados por el movimiento del suelo durante distintos temblores. Con estudios anteriores se identificaron amplificaciones altas en la banda de frecuencia entre 1 y 10 Hz. Actualmente no se cuenta con un modelo del subsuelo geológico-sísmico confiable a profundidades tales que puedan definir adecuadamente los efectos de sitio, a pesar de la alta actividad sísmica de la región y la relativa cercanía de la ciudad con la costa y otras fuentes sismogénicas.*

*Este trabajo emplea el método convencional de Autocorrelación Espacial (SPAC, por sus siglas en inglés), y otro inédito que llamamos Calicatas SPAC para evaluar el efecto de los embovedados en el peligro sísmico de la ciudad. El trabajo de campo se desarrolló durante los meses de junio y julio de 2011 considerando diez arreglos. Los resultados obtenidos dotan de un número de elementos que permiten interpretar los daños históricos y conocer con más precisión los efectos de sitio de la ciudad para fortalecer la microzonación sísmica propuesta, así como evaluar el peligro sísmico con mayor certeza.*

*Palabras clave: efecto de sitio, peligro sísmico, SPAC, Calicatas SPAC.*

### ABSTRACT

*The soil structure of Tuxtla Gutiérrez valley has generated great interest because of observed structural damage caused by ground motion during different earthquakes. Previous studies identified high amplifications in a frequency band of 1 - 10 Hertz. At the moment there is not a reliable subsoil geologic-seismic model to depths that can define properly the site effect, despite the high seismic activity of the region and the relative proximity of the city to the coast and other seismogenic sources.*

*This work uses the conventional Spatial Autocorrelation Method (SPAC), and another unpublished methods that we called Calicatas SPAC for assess the effect of the river vault on the seismic hazard in the city. The field work was carried out on June and July of 2011 using ten observation arrays. The obtained results provide a number of elements that allow us to interpret historical damage, to know with more precision the site effects in the city, to fortify the proposed seismic zones, as well as to evaluate the seismic hazard with more certainty.*

*Key words: site effect, seismic hazard, SPAC, Calicatas SPAC.*

## INTRODUCCIÓN

La estructura del subsuelo del valle de Tuxtla Gutiérrez ha sido motivo de interés debido a que se han observado daños estructurales ocasionados por el movimiento del suelo durante diversos temblores. Aunado a lo anterior, actualmente no se cuenta con un modelo del subsuelo geológico-sísmico confiable a profundidades que permitan definir adecuadamente los efectos de sitio, dada la alta actividad sísmica de la región y el número de fuentes sismogénicas que pueden ocasionar peligro para sus habitantes.

El movimiento del suelo genera amplificaciones dinámicas producto de los efectos locales asociados a sus propiedades, por lo que las ondas sísmicas inducidas producen un efecto de difracción múltiple al encontrarse con las fronteras entre estratos, generando interferencias destructivas y constructivas que se traducen en atenuaciones y amplificaciones, respectivamente. Considerando esto, es de interés fundamental en la respuesta dinámica del suelo determinar las amplificaciones que experimenta el movimiento sísmico al momento en que las ondas se propagan a través de los estratos.

A fin de poder realizar una estimación de dichos efectos en el suelo, se requiere determinar la variación de la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ), dependiendo de la profundidad. Se ha observado que en los valles donde los espesores de sedimentos se extienden a profundidades aproximadas de hasta 40 m, como es el caso de Tuxtla Gutiérrez (Ordóñez-Ruiz, 2008), resulta necesario conocer las características de los depósitos someros, debido a la amplificación de las ondas sísmicas de periodo corto (entre 0.5 y 1 s) en el centro de la ciudad.

Sin embargo, los métodos de exploración sísmica convencionales de reflexión y de refracción son complicados de aplicar en áreas urbanizadas por la limitación del uso de una fuente artificial, por lo que cada vez toman más importancia las técnicas basadas en microtemblores, razón por la cual este trabajo emplea uno de estos métodos basados en microtemblores que es denominado método de Autocorrelación Espacial (SPAC, por sus siglas en inglés *Spatial Autocorrelation Method*).

Lo anterior en virtud de que, si bien en México los estudios con microtemblores son usados mayormente en estudios de microzonificación sísmica, empleando, generalmente, la técnica de la cociente espectral H/V, técnica previamente empleada en Tuxtla Gutiérrez a través de los estudios de Narcía-López et al., (2006) y Piña-Flores, (2012), se tienen evidencias de que es conveniente complementar sus resultados con otras técnicas como SPAC (Vázquez-Rosas et al., 2011).

## MÉTODO DE AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL (SPAC)

Los microtemblores están conformados básicamente por ondas superficiales y, asumiendo que son estacionarios

en el espacio y en el tiempo, Aki (1957) propuso el método SPAC, el cual tiene el propósito de obtener el modelo estructural de velocidades. Para ello se requiere registrar microtemblores simultáneamente en, por lo menos, dos estaciones que conforman un arreglo instrumental equidistante. Tras procesar la información se obtiene la curva de dispersión de ondas Rayleigh, que posteriormente se usa para determinar la estructura de velocidades mediante las ondas superficiales Rayleigh (Aguirre-González et al., 2006).

La metodología descrita por Aki (1957) considera un arreglo de estaciones dispuestas en forma de un triángulo equilátero inscrito en un círculo para el registro de microtemblores mediante estaciones colocadas en los vértices y centro del arreglo (Figura 1).

El movimiento del suelo en dos localizaciones de la superficie  $(x, y)$  y  $(x+\xi, y+\eta)$  puede ser caracterizado como  $u(x, y, t)$  y  $u(x+\xi, y+\eta, t)$ , siendo la función de correlación espacial  $\phi(\xi, \eta, t)$ . Ésta fue definida por Aki (1957) para el caso en dos dimensiones con la ecuación (1):

$$\phi(\xi, \eta, t) = \bar{u}(x, y, t) \cdot \bar{u}(x + \xi, y + \eta, t) \quad (1)$$

donde  $\xi$  y  $\eta$  son incrementos de longitud de las coordenadas de cada estación respecto a las coordenadas  $(x, y)$  de la estación central o estación de referencia;  $t$  es el tiempo en segundos y  $\bar{u}(t)$  es la media de la función  $u(t)$  en el dominio del tiempo. Remplazando  $(\xi, \eta)$  por las coordenadas polares, Aki (1957) muestra que el promedio azimutal de la función de la correlación espacial puede expresarse como se presenta en la ecuación (2):

$$\bar{\phi}(r) = \frac{1}{2\pi} \int \phi(r, \psi) d\psi \quad (2)$$

donde  $r$  y  $\psi$  son las coordenadas polares definidas por  $\xi = r \cos \psi$  y  $\eta = r \sin \psi$ , las coordenadas polares están definidas por el radio  $r$  y su ángulo  $\psi$ . Aki (1957) demostró que el

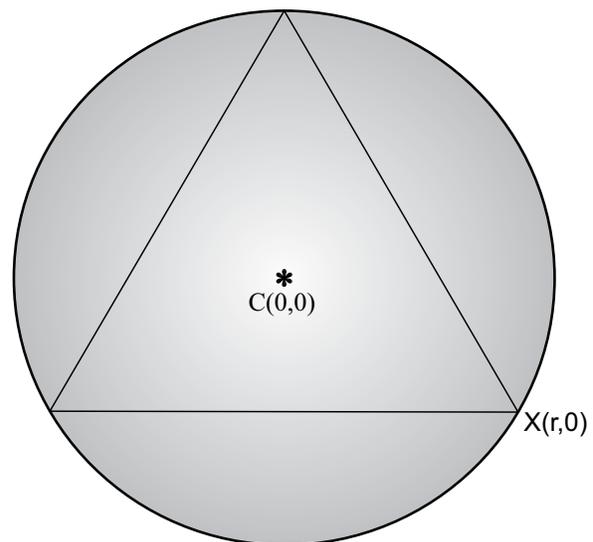


Figura 1. Arreglo geométrico triangular SPAC, donde cada vértice corresponde a una estación de medición (Flores-Estrella, 2004).

promedio azimutal de la función de autocorrelación espacial  $\phi(r)$  y la densidad de poder espectral  $\Phi(\omega)$  del campo de ondas  $u$ , donde  $\omega$  es la frecuencia angular, se relacionan como se muestra en la ecuación (3).

$$\bar{\phi}(r) = \frac{1}{\pi} \int \Phi(\omega) J_0 \left( \frac{\omega r}{c} \right) d\omega \quad (3)$$

donde  $J_0$  es la función Bessel de orden cero y  $c$  se define como la velocidad de fase en la frecuencia  $\omega$ . Para aplicarla al caso de dispersión de ondas, sólo se requiere sustituir  $c(\omega)$  por  $c$ . Considerando que aplicamos un filtro del tipo pasa banda a la señal, la densidad espectral se expresa conforme la ecuación (4):

$$\Phi(\omega) = P(\omega_0) \delta(\omega - \omega_0) \quad (4)$$

donde  $P(\omega_0)$  es la densidad de poder espectral para la frecuencia  $\omega_0$  y la función Dirac es  $\delta(\omega)$ . El promedio azimutal de la función de correlación espacial, Aki (1957), puede escribirse como la ecuación (5):

$$\bar{\phi}(r) \equiv \bar{\Phi}(r, \omega_0) = P(\omega_0) J_0 \left( \frac{\omega_0 r}{c(\omega_0)} \right) \quad (5)$$

De acuerdo con Aki (1957) el coeficiente de autocorrelación está definido por la ecuación (6):

$$\rho(r, \omega_0) = \frac{\phi(r, \psi, \omega_0)}{\phi(0, \psi, \omega_0)} \quad (6)$$

Como  $\rho(\omega)$  no depende de la posición, se escribe el promedio del coeficiente de autocorrelación espacial como en la expresión (7):

$$\rho(r, \omega_0) = J_0 \left( \frac{\omega_0 r}{c(\omega_0)} \right) \quad (7)$$

El coeficiente SPAC  $\rho(r, \omega)$  puede ser obtenido directamente en el dominio de la frecuencia usando la transformada de Fourier de los microtemores observados, de la siguiente forma (8):

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Re[Scx(\omega, r, \theta)]}{\sqrt{Sc(\omega) \cdot Sx(\omega, r, \theta)}} d\theta \quad (8)$$

donde  $Re[Scx(\omega, r, \theta)]$  es la parte real de un valor complejo,  $Sc(\omega)$  y  $Sx(\omega, r, \theta)$  son los espectros de potencia de los microtemores en los sitios,  $C$  y  $X$  respectivamente, y  $Scx(\omega, r, \theta)$  es el espectro cruzado (Cross spectrum) entre los dos sitios. Esta ecuación significa que los coeficientes SPAC son obtenidos por medio del promedio de una función de coherencia normalizada definida como co-espectro (co-spectrum) entre dos sitios con respecto a la dirección  $\theta$ . La ecuación (8) puede ser obtenida directamente a partir de los microtemores observados usando técnicas como el método de la Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier transform* FFT). La velocidad de fase puede ser calculada para la frecuencia ( $\omega$ ) a partir del argumento de la función Bessel de la ecuación (7).

Yokoi y Margaryan (2008) presentan una interpretación teórica del trabajo de Aki (1957) basada en la teoría de la interferometría sísmica. No obstante los principales cambios

que se han presentado en la propuesta original de Aki (1957) están en la libertad de los arreglos lineales tales como las Calicatas SPAC que se presentan en este trabajo.

## MÉTODO DE AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL SPAC EN LÍNEA

Chávez-García *et al.*, (2005) presentaron una extensión del método SPAC, donde las curvas de dispersión de velocidad de fase fueron obtenidas a partir de los registros de datos de un arreglo sísmico temporal con una geometría muy irregular. La diferencia básica con respecto al método propuesto por Aki (1957), fue el sustituir el promediado azimutal por el promediado temporal. Los buenos resultados obtenidos en ese trabajo condujeron a proponer arreglos de estaciones tan diferentes como fuera posible de un triángulo, por ejemplo una línea de estaciones (Chávez-García *et al.*, 2006). Los resultados permitieron liberar al método SPAC de las restricciones geométricas en la forma del arreglo usado a que estaba sujeto (Aguirre-González *et al.*, 2006).

Pese a esto todavía no se conocen las causas de la estabilidad de las correlaciones, o de qué factores dependen los valores de éstas, falta investigar sobre la relación con la distancia, la litología, los posibles cambios en ésta, el tiempo, e incluso las condiciones meteorológicas existentes en el momento de la medición (Aguirre-González *et al.*, 2006).

No obstante que las mediciones hechas sólo con dos estaciones implican más cuidado y tiempo en el análisis de los datos, además de que se elimina la redundancia de los datos, tienen la gran ventaja de que sólo se requieren dos instrumentos para encontrar un modelo de velocidades a partir de registros de microtemores (Flores-Estrella, 2004).

Por último, pese a que se considera que el uso de los microtemores puede ir más allá de sólo proporcionar información acerca de la frecuencia fundamental de un sitio, el análisis cuidadoso de los registros de microtemores y el uso de ciertos métodos para este análisis puede llevar a información más completa acerca de la estructura de velocidades de un área de estudio; además es una herramienta de utilidad para completar los mapas de microzonificación en algunas ciudades del país (Flores-Estrella, 2004).

## ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Tuxtla Gutiérrez está ubicado en la Depresión Central del estado de Chiapas presentando relieve montañoso al norte y al sur. Su extensión territorial es de 412.40 km<sup>2</sup>, lo que representa el 3.26% de la región Centro y el 0.55% de la superficie estatal. Esta ciudad limita al norte con los municipios de San Fernando y Usumacinta, al este con Chiapa de Corzo, al sur con Suchiapa y al oeste con Ocozucuaul y Berriozábal (CEIEG, 2010).

La cabecera municipal es, a su vez, la capital del estado y lugar central de la región I Metropolitana y se ubica en

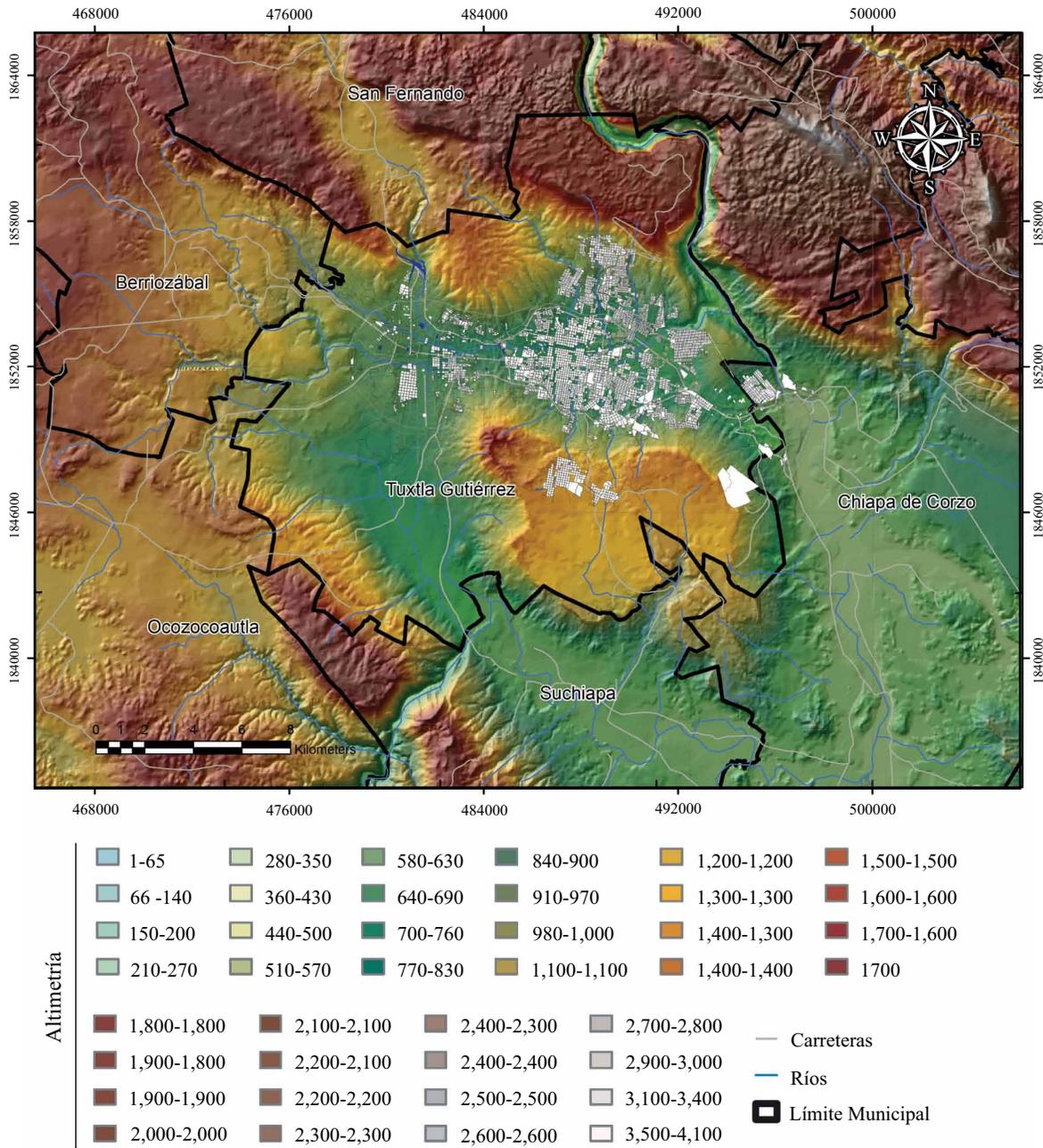


Figura 2. Mapa de ubicación del municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

un valle de laderas tendidas. Las coordenadas de la ciudad son: 16°45'10" de latitud norte y 93°07'00" de longitud oeste y se ubica a una altitud media de 600 metros sobre el nivel del mar (CEIEG, 2010), (Figura 2).

El territorio municipal se conforma de sierras altas con laderas tendidas, llanuras con aportes aluviales y mesetas por erosión; en el parteaguas norte prevalece un conjunto de sierras cuya altitud no rebasa los 1,200 msnm, lo cual genera que el relieve presente una serie de lomeríos de pendiente suave, que originan un modelo erosional representativo de una baja densidad de drenaje.

**DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO SPAC**

El trabajo de campo se desarrolló en los meses de junio y julio de 2011 considerando diferentes arreglos. Los lugares donde se realizaron los arreglos SPAC son ocho, cuatro en el centro de la ciudad, otro en el estacionamiento del estadio de fútbol Víctor Manuel Reyna, uno más en las cercanías de la Torre Chiapas, otro punto de medición se realizó en la Ciudad Universitaria de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), y finalmente uno en la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).

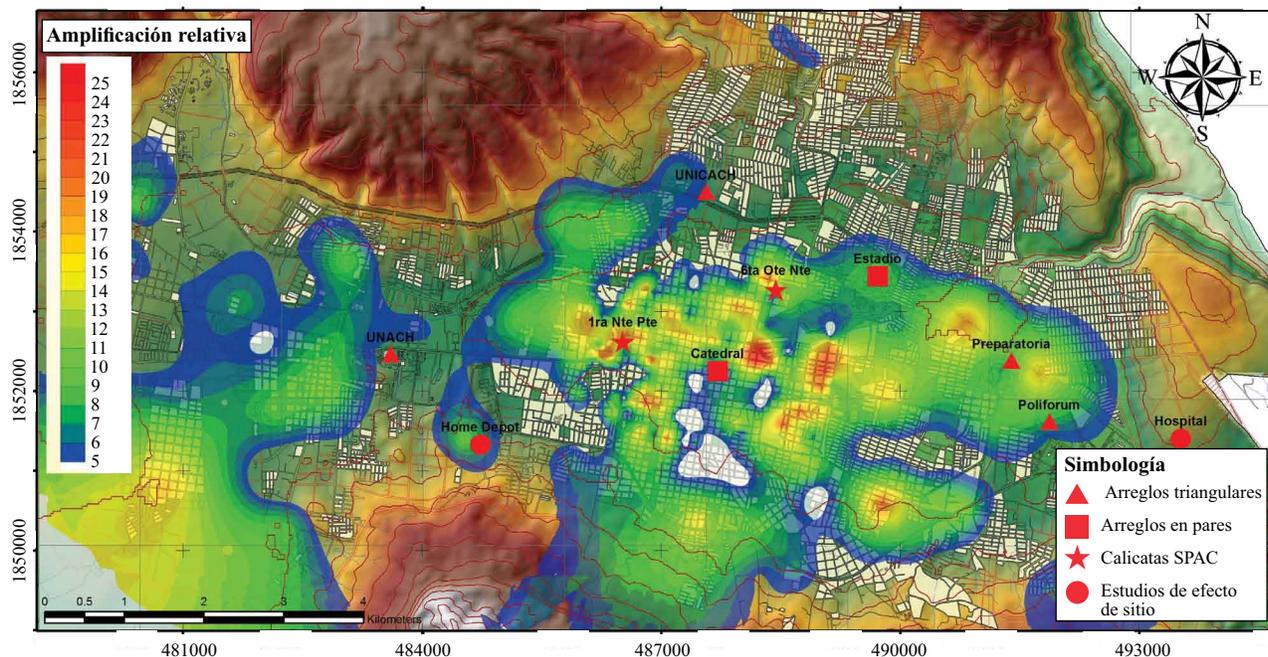


Figura 3. Ubicación de los sitios donde se desarrollaron estudios de SPAC, modificado de Piña-Flores (2012).

Adicionalmente se incluyeron dos perfiles de velocidad de dos zonas de las que no se tenían datos. Estos perfiles fueron obtenidos de dos estudios de efecto de sitio desarrollados en el Hospital bicentenario, en la zona norte oriente (Aguilar-Becerril *et al.*, 2009), y cerca de las instalaciones de Home Depot, zona sur poniente de la ciudad (Aguilar-Becerril *et al.*, 2006).

El interés por conocer la estructura de velocidades de estos sitios, se debió a que en cinco de los puntos se observaron daños estructurales asociados a efecto de sitio, de acuerdo con estudios anteriores (Narcía-López *et al.*, 2006; Piña-Flores, 2012). En tres de los sitios restantes (estacionamiento del estadio “Zoque” Víctor Manuel Reyna, Facultad de Ingeniería de la UNICACH y cercanías de la Torre Chiapas) el propósito se debió a que era posible contar con espacio suficiente para hacer arreglos hasta de 400 m por lado de los triángulos equiláteros convencionales y correlaciones lineales, así como poder tener el perfil de velocidades de los dos puntos donde hay una estación acelerométrica fija UNICACH (ladera norte) y UNACH (centro poniente de la ciudad) (Figura 3 y Tabla 1).

### RESULTADOS DE LA TÉCNICA SPAC

Respecto al equipo de adquisición de datos, los registros se recopilan con dos consolas de la manufactura Kinometrics, modelo Makalu de seis canales de 24 bits con sistema electrónico. A estos equipos se les conecta de manera externa un sensor triaxial marca EpiSensor modelo

FBA ES-T, uno triaxial de velocidad marca Lennartz electronic LE-3Dlite MKII y una antena GPS. En la Tabla 2 se presentan las características técnicas de la registradora y sensores empleados.

Se obtuvieron registros de 3,600 segundos de grabación a 100 muestras por segundo en cada triángulo equilátero en que se midieron simultáneamente en las estaciones ubicadas en los vértices (Figura 4). Para un tiempo de gra-

Tabla 1. Características de los estudios SPAC realizados en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Lugar	Tiempo de registro (min)	Tamaño y características del arreglo (m)
Ciudad Universitaria, UNICACH	30	5, 15, 30, 50 y 75
Preparatoria CETIS 138	30	5, 15, 30, 50, 75 y 100
Campo de fútbol de la facultad de Ingeniería de la UNACH	30	5, 15, 30, 50 y 75
Poliforum, Chiapas	30	5, 15, 30, 50, 75 y 100
Calicatas SPAC en 6ª Oriente Norte entre 12 y 13 Norte*	30	10 de 100 m lineales
Calicatas SPAC en 1ª Norte Poniente entre 12 y 13 Poniente	30	5 de 100 m lineales
Estacionamiento del estadio de fútbol Víctor Manuel Reyna	120	Pares de 50 y 70
Explanada de la Catedral de San Marcos	60	Pares 30 y 60

\* En este punto se desarrollaron dos tipos de arreglos SPAC: Calicatas y correlación lineal.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la registradora y sensores empleados.

<b>Registradora: Kinometrics Makalu</b>	
Canales para sensores	Seis
Ganancia	Selección del usuario x2, x6, x20, x60 y x200
Rango dinámico	>130 dB a 200 sps
Frecuencia de respuesta	DC 80 Hz a 200 sps
Modos de adquisición	Continua o por disparo
Formato de salida	24 bits (3 bytes)
Temperatura de operación	Desde -20 ° hasta 70 °C ( de 0 ° a 160 °F)
Humedad	0-100 %
<b>Sensor de aceleración: EpiSensor FBA ES-T</b>	
Rango dinámico	155 Db
Ancho de Banda	Hasta 200 Hz
Rango de escala completa	Seleccionada por el usuario: $\pm 0.25$ g, $\pm 0.50$ g, $\pm 1$ g, $\pm 2$ g y $\pm 4$ g
Salidas	$\pm 2.5$ V y $\pm 10$ V (terminal única) y $\pm 5$ V y $\pm 10$ V (diferencial)
Linealidad	< 1000 $\mu\text{g}/\text{g}^2$
Histéresis	< 0.1 % de la escala completa
Consumo de energía	12 mA $\pm$ 12 V (amperaje estándar), 35 mA $\pm$ 12 V (amperaje de bajo ruido)
Temperatura de operación	Desde -20 ° hasta 70 °C (de 0 ° a 160 °F)
<b>Sensor de velocidad: Leennartz electronic LE-3Dlite MKII</b>	
Rango dinámico	136 Db
Ancho de Banda	Hasta 100 Hz
Amortiguamiento	0.707 del crítico
Salidas	$\pm 2.5$ V y $\pm 10$ V (terminal única) y $\pm 5$ V y $\pm 10$ V (diferencial)
RMS Ruido	< 3 nm/s
Consumo de energía	12 mA $\pm$ 12 V (amperaje estándar), 35 mA $\pm$ 12 V (amperaje de bajo ruido)
Temperatura de operación	Desde -15 ° hasta 60 °C (de 10 ° a 140 °F)

bación de 60 minutos se tomaron ventanas de 60 segundos, por lo tanto se cuenta con 90 espectros de potencia en cada vértice del triángulo equilátero.

Una vez obtenidos los registros, sólo se tomó la componente vertical y se filtraron las señales con el software Matlab, utilizando un filtro ventana Von Hann pasa bajas de 100 muestras por segundo con frecuencia de corte de 60 Hz. Una vez filtradas las señales, se utilizó el software Geopsy, el cual tiene una herramienta para procesar con la técnica de SPAC, donde se introducen los parámetros: frecuencia de muestreo, componente y coordenadas espaciales. Una

vez reconocida la señal, se procede a realizar anillos.

Posteriormente se obtienen las correlaciones entre pares de estaciones, donde se verificó que la forma de las funciones de correlación observadas se asemejara a las funciones Bessel de primera especie y orden cero (Figura 5), condición que debe cumplirse para obtener resultados confiables (Campillo, 2006). El promedio de las correlaciones de las 90 ventanas de cada triángulo permite estimar el coeficiente de autocorrelación y, el primer cruce de esta función por cero es la frecuencia de interés para cada triángulo.

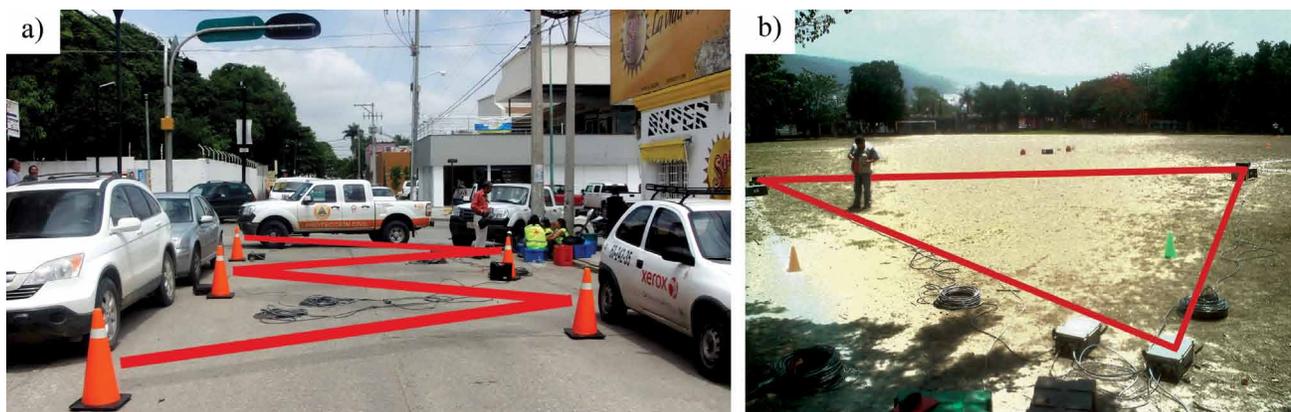


Figura 4. (a) Arreglo de Calicatas SPAC en el centro de la ciudad en la avenida Ira Norte entre 12 y 13 Poniente y (b) Arreglo SPAC en el campo de fútbol de la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas.

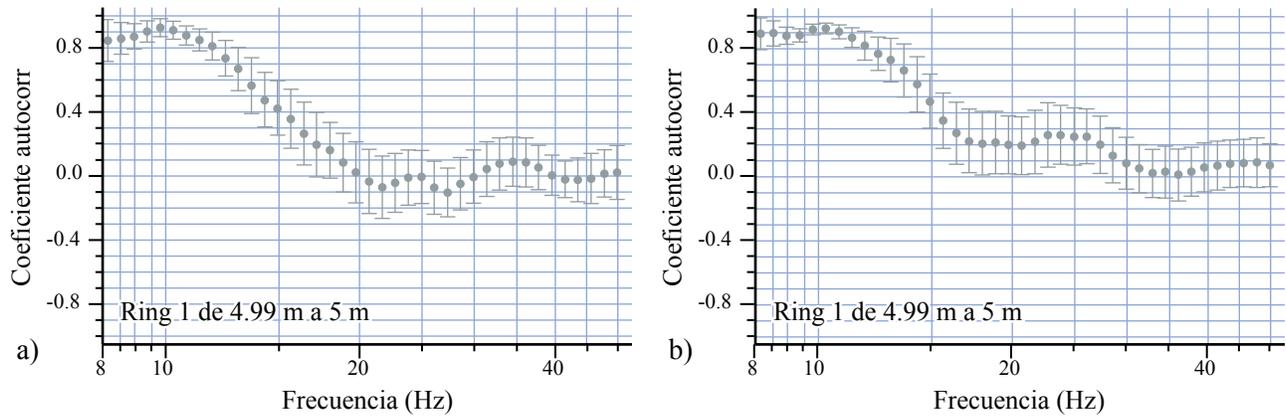


Figura 5. Coeficiente de autocorrelación para un arreglo de 5 m. Las gráficas de los incisos (a) y (b) representan las curvas de autocorrelación de dos puntos de medición simultánea para las Calicatas.

Se relacionó el coeficiente de autocorrelación con la función Bessel, en cuyo argumento aparece la dependencia de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh con la frecuencia. A partir de los coeficientes de autocorrelación se obtiene la variación de la velocidad de fase en función de la frecuencia de las estaciones de cada triángulo. Se calcularon tres curvas de velocidad de fase para cada triángulo, las cuales representan el promedio y su correspondiente desviación estándar (superior e inferior). Con las velocidades de fase definidas se construye la curva de dispersión de cada arreglo, con las que es posible obtener la ley de velocidades en el sitio estudiado.

Posteriormente, se obtiene la curva de dispersión a partir de la curva de autocorrelación, para después invertir la curva teniendo un modelo inicial del modelo estratigráfico. Después se invierte la curva de autocorrelación, obteniendo un perfil de velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) y de cizalla ( $V_s$ ). En la Figura 6, se muestra la curva de dispersión para el modelo obtenido de la inversión de la curva de autocorrelación.

El nombre de Calicatas proviene de la técnica usada con sondeos eléctricos y que permite construir perfiles de resistividad. En este caso, el utilizar varios arreglos del mismo tamaño, recorridos en forma lateral sobre una línea, nos permitió generar perfiles que muestran la variación lateral de las propiedades elásticas y espesores de los estratos. Las Figuras 7 y 8 muestran los resultados obtenidos realizando las Calicatas SPAC.

En la Figura 7 se despliega el conjunto de perfiles de velocidad para cada arreglo de las Calicatas SPAC, para las ondas de compresión ( $V_p$ ) y de cizalla ( $V_s$ ) del punto estudiado. En la Figura 8 se presenta una tomografía de las velocidades  $V_s$  (parte derecha) y  $V_p$  (parte izquierda) considerando los arreglos realizados en la zona.

El perfil de velocidades obtenido con cada arreglo SPAC, se correlacionó con el perfil geotécnico elaborado (Figura 9), considerando al menos 40 estudios de mecánica de suelos a lo largo de la mancha urbana, como los presentados por Ordóñez-Ruiz (2008).

En el Figura 10 se sintetizan la ubicación y los perfiles de velocidad  $V_p$  (parte superior) y  $V_s$  (parte inferior) de seis de los arreglos SPAC realizados.

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Las Calicatas SPAC permitieron generar perfiles que muestran la variación lateral de las propiedades elásticas y espesores de los estratos en la zona del centro de la ciudad, no obstante que sólo se emplearon en dos sitios. El empleo de éstas permitió descartar la presencia de paleocanales

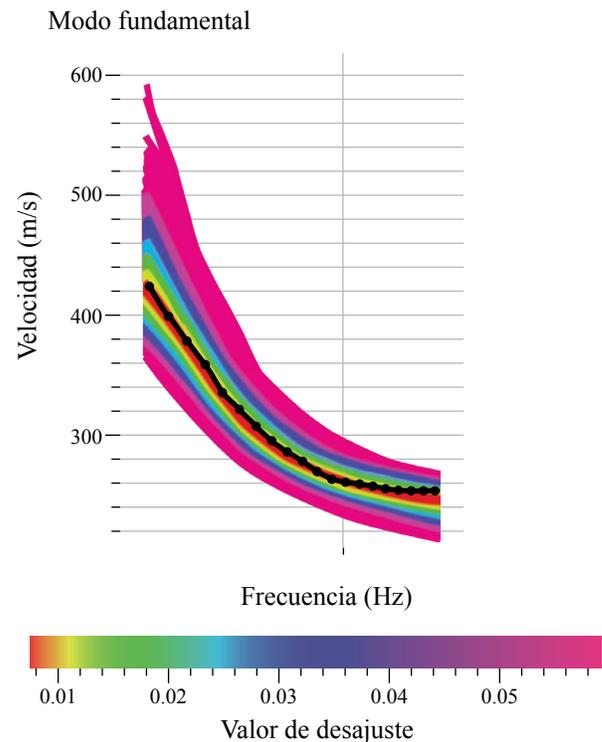


Figura 6. Curva de dispersión para el modelo obtenido de la inversión.

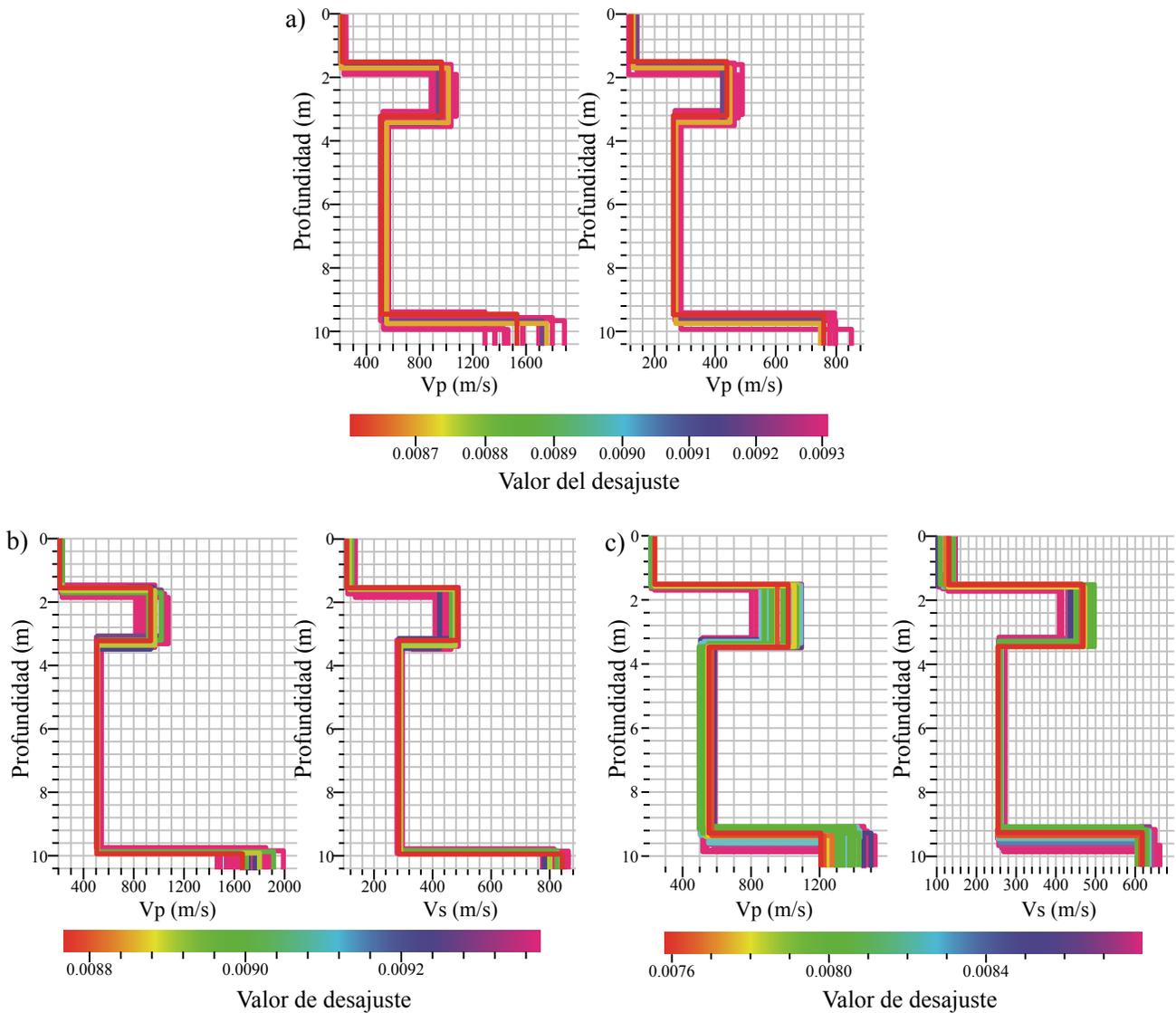


Figura 7. Perfil de velocidades para los arreglos de las Calicatas en la avenida 1ra Norte entre 12 y 13 Poniente,  $V_p$  (izquierda) y  $V_s$  (derecha), las gráficas de los incisos (a), (b) y (c), representan los perfiles de velocidad de tres puntos diferentes a partir de una medición simultánea.

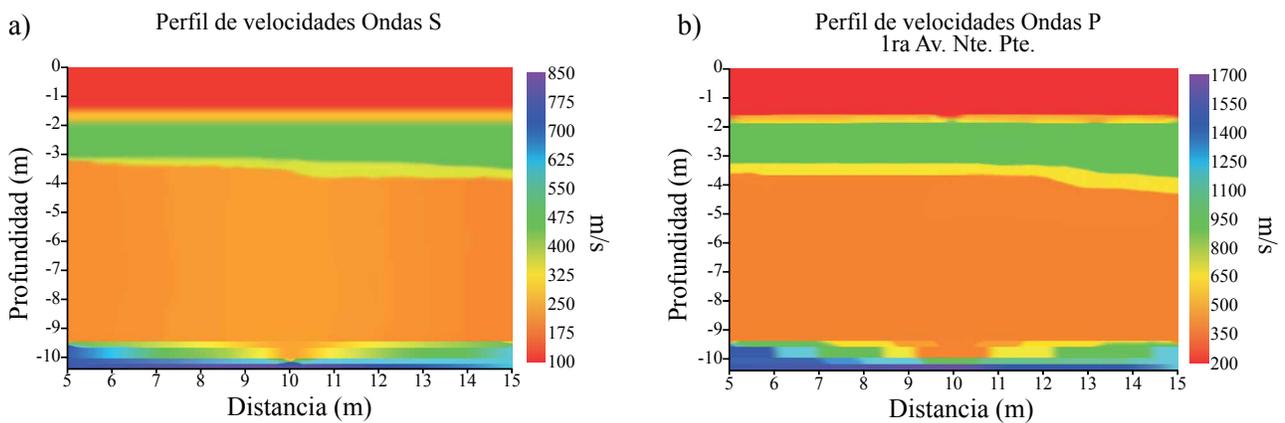


Figura 8. Tomografía para el perfil de velocidades para los arreglos de las Calicatas en la avenida 1ra Norte entre 12 y 13 Poniente, (a)  $V_s$  y (b)  $V_p$ .

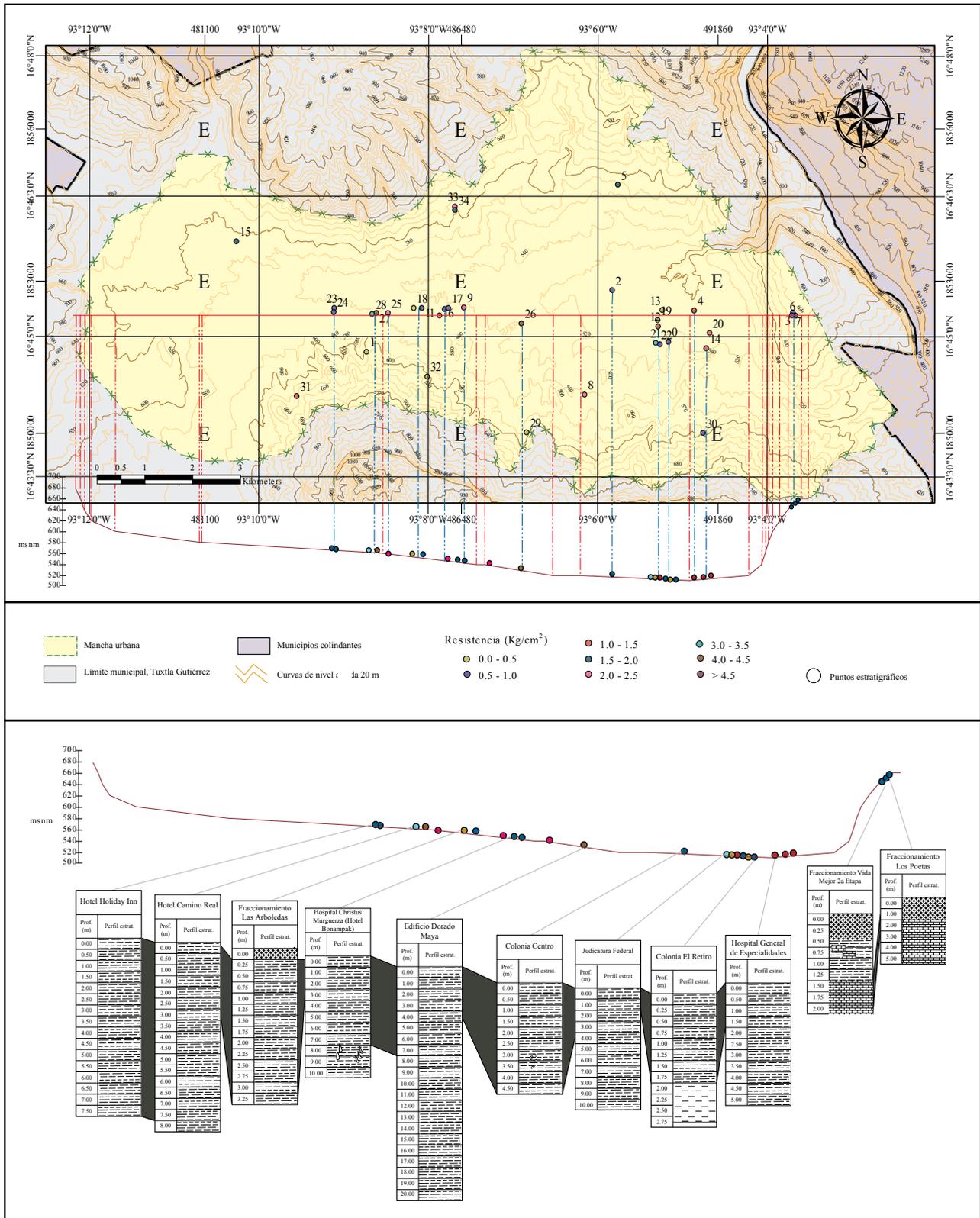


Figura 9. Perfil con las características estratigráficas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Para imprimir esta figura en un tamaño mayor puede dar click aquí, en la imagen u obtenerla en la dirección: [http://satori.geociencias.unam.mx/30-1/RMCG\\_30-1\\_GonzalezHerrera\\_et\\_al\\_Fig09.pdf](http://satori.geociencias.unam.mx/30-1/RMCG_30-1_GonzalezHerrera_et_al_Fig09.pdf)

TUXTLA GUTIÉRREZ

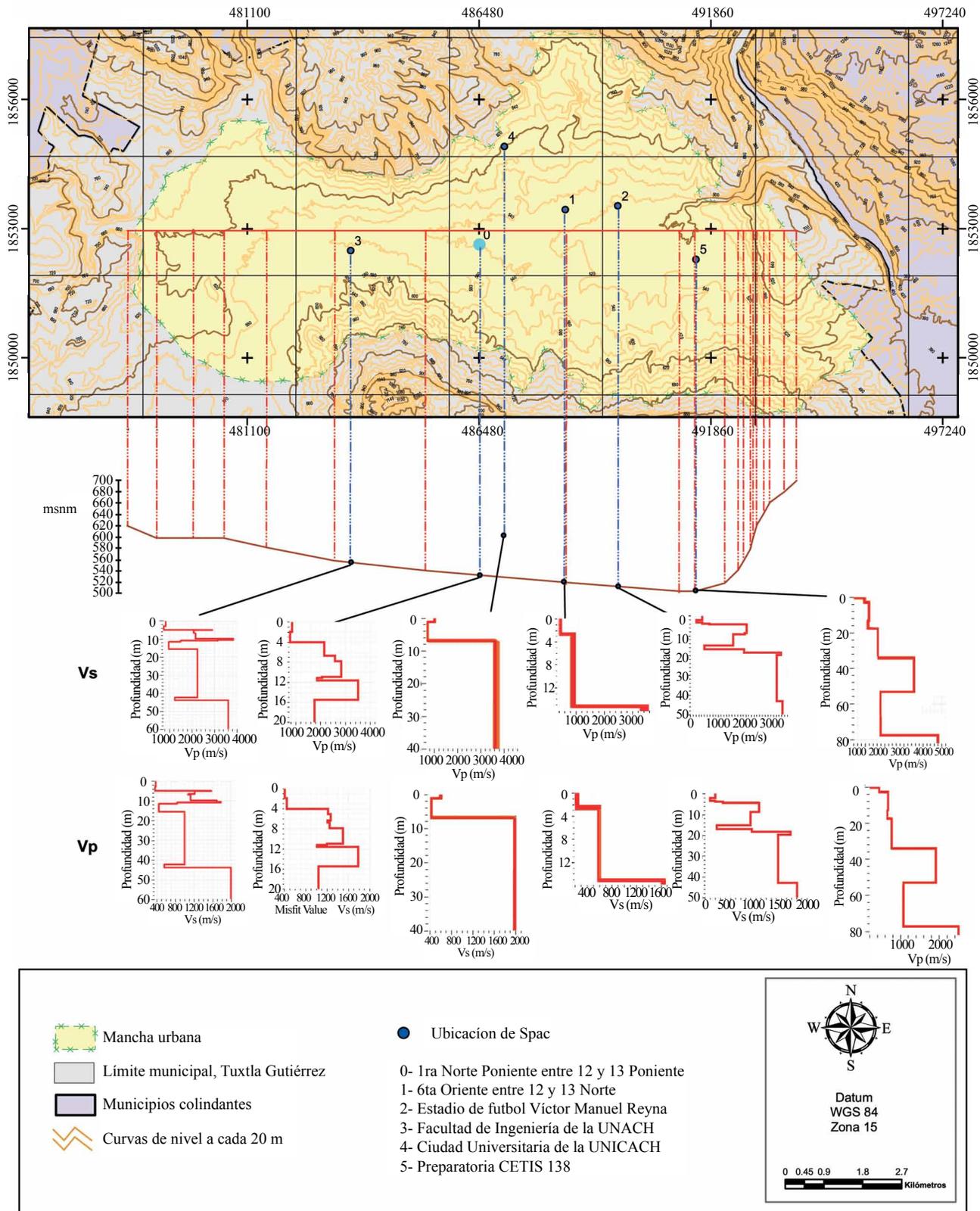


Figura 10. Perfiles de velocidad  $V_s$  y  $V_p$ , obtenidos en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

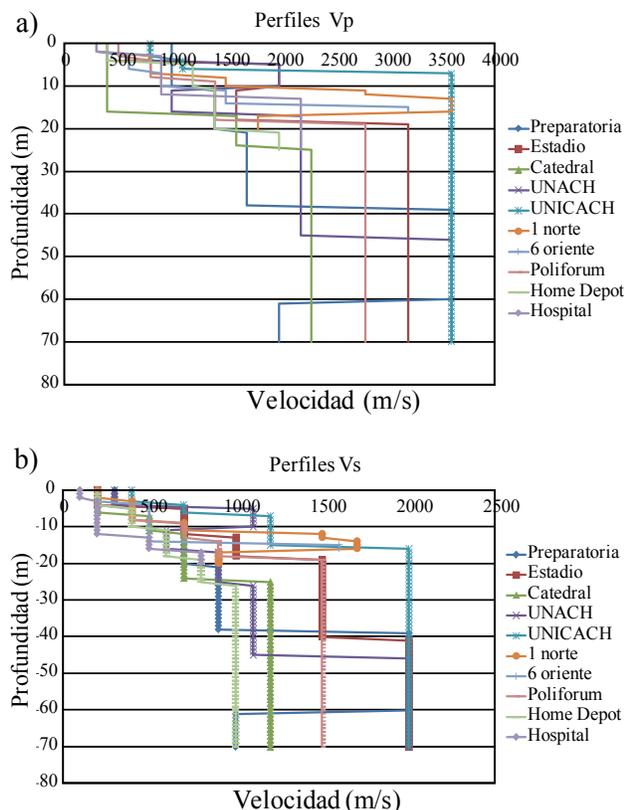


Figura 11. (a) Perfiles de velocidades realizados para  $V_p$  y (b)  $V_s$ .

en dos sitios estudiados y ubicar el basamento ingenieril (estrato donde se superan las velocidades de onda de 720 m/s) a 8 m de profundidad.

Las gráficas mostradas en la Figura 11, presentan la superposición de los perfiles de velocidades realizados y en ellas se observan, de manera global, los tipos de perfiles en que se puede clasificar el comportamiento sísmico de la ciudad y su correlación con las amplificaciones relativas reportadas (González-Herrera *et al.*, 2012).

Para la construcción de las gráficas se emplearon los perfiles de los ocho arreglos SPAC, las profundidades alcanzadas dependían de las características de las longitudes propias del arreglo, así como de las propiedades de los sensores.

Para evaluar el peligro sísmico, considerando los efectos de sitio, se empleó el software PRODISIS versión 2 del Manual de obras civiles de CFE (2008), el cual permite obtener un espectro de diseño en roca para peligro uniforme, adicionalmente, se puede introducir el perfil de velocidad  $V_s$  para considerar los efectos de sitio. Cabe mencionar que este manual de diseño sísmico es empleado en el estado de Chiapas al carecer éste de normas técnicas.

Mediante la metodología de PRODISIS se generan los espectros de roca y espectros de peligro uniforme considerando periodos de retorno de 50 años (grupo B), 100 años (grupo A) y 500 años (grupo A+), los cuales se

consideran para tres grupos de construcciones, con base en su importancia (B edificaciones comunes, A edificaciones importantes, A+ edificaciones esenciales). En la Figura 12 se observa que para el grupo de importancia A y el grupo A+ no es considerable la diferencia del espectro para roca y es el mismo espectro de peligro uniforme.

Para conocer el efecto de sitio se introduce en el software de CFE-2008 el perfil promedio de velocidades de la zona centro, obteniendo así un espectro de diseño que incluye el efecto de sitio. En la Figura 13 se puede observar que al incluir el efecto de sitio los espectros de diseño obtenidos con PRODISIS presentan amplificaciones del orden del 45%.

El basamento ingenieril, o suficientemente rígido para la cimentación de construcciones, se encuentra en los puntos que rebasan las velocidades de 720 m/s, los cuales se asocian con profundidades de 6 a 10 m en promedio en los sitios donde se realizaron los estudios (salvo en 6ta oriente y catedral, en el centro, y Home Depot, en la ladera sur, que alcanzan hasta 30 m). La región donde se concentraron los daños importantes de acuerdo a los reportes de sismos históricos en la ciudad, el basamento ingenieril tiene profundidades de entre 10 y 20 m.

No obstante que PRODISIS permite la determinación del peligro sísmico a través de un espectro de diseño que incluye efectos de sitio, se observa que la forma del espec-

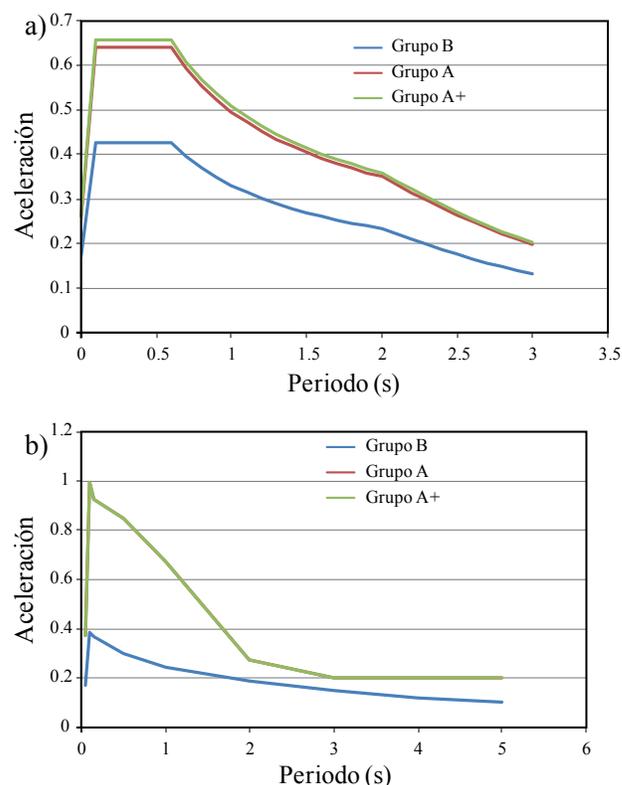


Figura 12. (a) Espectro de diseño convencional en roca y (b) espectro de peligro uniforme en roca, para tres grupos de importancia, (CFE, 2008).

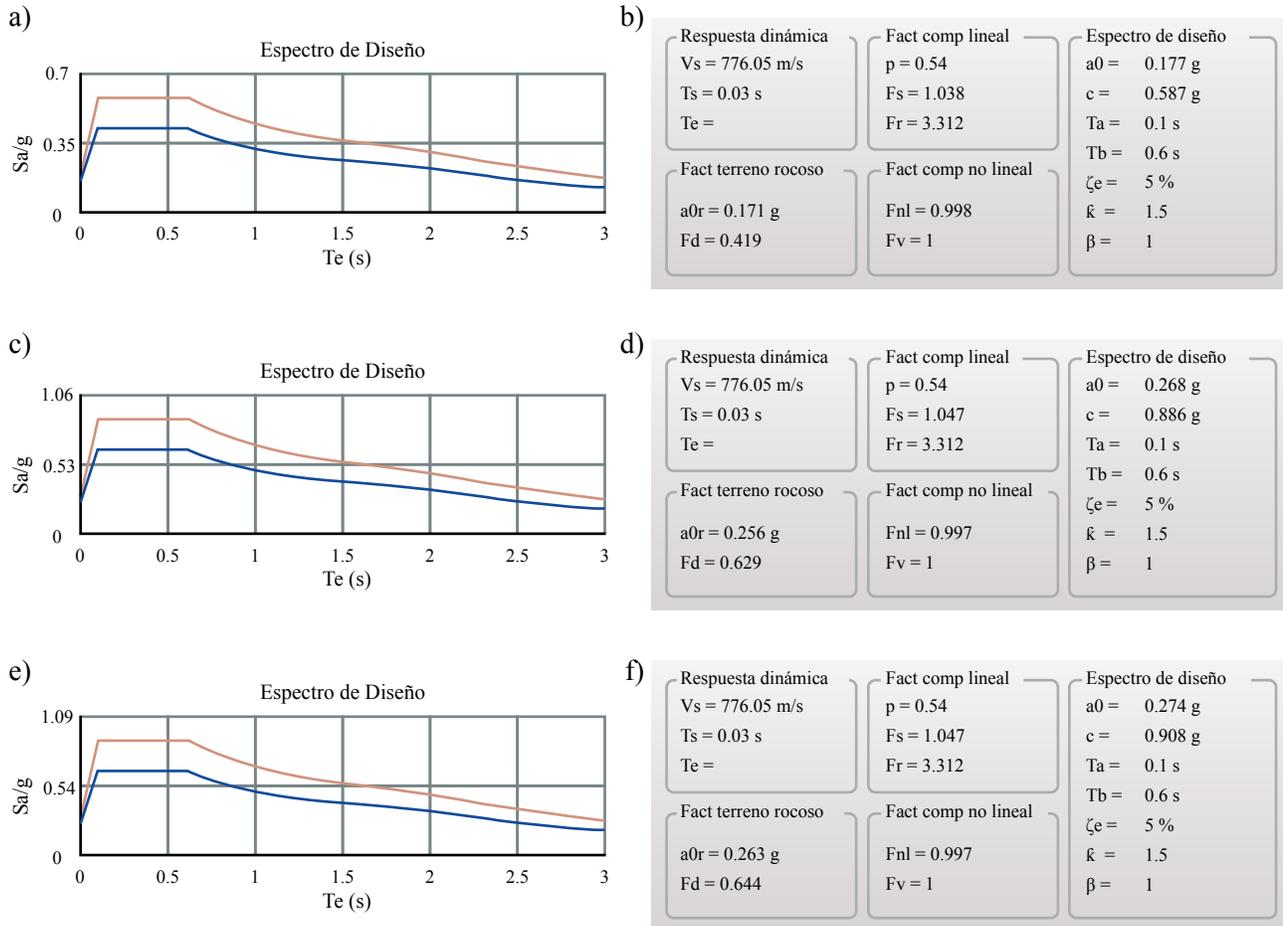


Figura 13. (a) Espectro de diseño para estructuras de importancia B, contemplando efecto de sitio; (b) parámetros de construcción del espectro de diseño para estructuras de importancia B; (c) espectro de diseño para estructuras de importancia A, contemplando efecto de sitio; (d) parámetros de construcción del espectro de diseño para estructuras de importancia A; (e) espectro de diseño para estructuras de importancia A+, contemplando efecto de sitio; (f) parámetros de construcción del espectro de diseño para estructuras de importancia A+.

tro es muy conservadora debido a que el efecto de sitio lo amplifica de igual manera a lo largo de prácticamente todo el espectro de diseño y no se concreta con mayor énfasis en la zona del periodo natural de vibración del suelo.

Realizando una correlación entre los distintos perfiles  $V_s$ , considerando la profundidad en que esta velocidad alcanza el basamento ingenieril (720 m/s) y normalizando este valor con respecto al punto más rígido entre las mediciones realizadas, se encuentra que las instalaciones de la UNICACH (en el libramiento norte poniente de la capital) alcanzan dicho basamento a 6 m de profundidad. Con base en esto desarrollamos la Tabla 3 y con los datos presentados en su cuarta columna elaboramos el mapa de la Figura 14, donde se correlaciona espacialmente esta normalización.

En la Figura 14 se observa que existe correlación entre los daños y las amplificaciones obtenidas para los casos donde los daños se ubican en la zona localizada entre los rangos 2-3 de la normalización, mismos que corresponden a profundidades entre 12 y 18 m. Estas profundidades son características de estratos saturados de arcillas expansivas (Ordóñez-Ruiz, 2008) y/o depósitos de erosión de baja

consolidación, recordando que donde se concentran los daños es el primer cuadro de la ciudad y en él se concentraron hasta siete afluentes del río Sabinal, los cuales han sido embovedados, desviados o secados y rellenados para el crecimiento de la mancha urbana.

Así mismo se asume que el daño que sufre una edificación por las ondas de un sismo depende en gran parte del tipo de terreno sobre el cual está construida y de los materiales empleados para su construcción (Garduño-Monroy et al., 2009), por lo que el efecto de sitio contribuye a los daños, además de las características de las construcciones que fueron dañadas.

## CONCLUSIONES

Con base en los resultados de los trabajos de campo y considerando el análisis de la respuesta sísmica del terreno, se desprenden las siguientes conclusiones:

Mediante arreglos SPAC y su procesamiento en distintas zonas de Tuxtla Gutiérrez, se determinó que la estructura

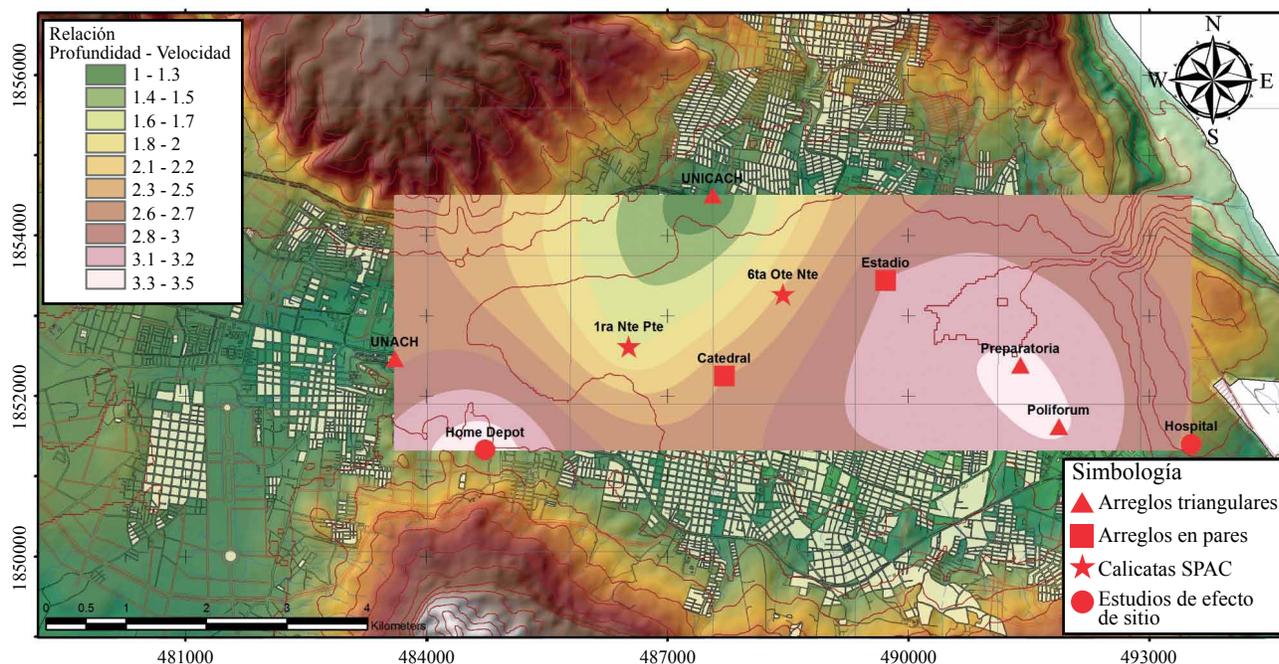


Figura 14. Relación normalizada de la velocidad de corte hasta (720 m/s) respecto a la profundidad donde esta es alcanzada, considerando el punto más rígido (Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, UNICACH).

de velocidades de propagación  $V_p$  varía entre 400 y 3,200 m/s, y  $V_s$  entre 200 y 1,500 m/s.

Los perfiles de velocidad obtenidos fueron empleados para considerar el efecto de sitio mediante el programa PRODISIS, los espectros de diseño resultantes presentan amplificaciones muy importantes (del orden del 45%).

Asimismo se observa que hay correlación entre los daños y las amplificaciones obtenidas. De la misma manera, existe correlación entre los daños y la profundidad donde se alcanza una velocidad de ondas de corte de 720 m/s.

Considerando lo anterior, se obtuvo que el punto más rígido de la ciudad resultó ser la UNICACH, misma que alcanzó la velocidad señalada (720 m/s) a 6 m de profundidad, donde no se observaron daños. No

sucedió así en las zonas ubicadas entre los rangos 2 y 3 de normalización indicados en la Tabla 3, mismas que alcanzaron dicha velocidad a profundidades entre 12 y 18 m, características de estratos saturados de arcillas expansivas o depósitos de erosión de baja consolidación, donde se observaron daños importantes por diversos sismos.

Finalmente, de acuerdo con los estudios desarrollados, podemos concluir que la técnica de Calicatas SPAC es muy útil para determinar perfiles de velocidad en zonas donde sea complicado realizar perfiles más grandes, adicionalmente permite evaluar la presencia de paleocanales o irregularidades geotécnicas que sean causantes del efecto de sitio.

Tabla 3. Características de los estudios SPAC y su relación con las propiedades dinámicas del suelo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Lugar	Periodo (s)	Amplificación relativa H/V	Normalización H / Vs=720 m/s
Ciudad Universitaria, UNICACH	0.2	2	1.0
Preparatoria CETIS 138	0.8	11	3.3
Campo de futbol de la facultad de Ingeniería de la UNACH	0.5	4	2.8
Polifórum, Chiapas	0.3	8	3.5
Calicatas SPAC en 6ª Oriente Norte entre 12 y 13 Norte*	0.6	16	2.4
Calicatas SPAC en 1ª Norte Poniente entre 12 y 13 Poniente	0.6	14	2.1
Estacionamiento del estadio de futbol Víctor Manuel Reyna	0.7	10	2.9
Explanada de la Catedral de San Marcos	0.6	8	2.4
Hospital de especialidades Bicentenario	0.4	4	2.8
Home Depot Libramiento Sur Poniente	0.3	7	3.4

\* En este punto se desarrollaron dos tipos de arreglos SPAC: Calicatas y correlación lineal.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor desea expresar su agradecimiento por el apoyo financiero recibido mediante el proyecto externo 856 del Instituto de Geofísica de la UNAM, así mismo agradecer al Dr. Carlos M. Valdés González por sus enseñanzas a lo largo de mis estudios, así como el apoyo del Dr. Allen Husker por la revisión del documento, del Lic. Luis Manuel García Moreno por las facilidades brindadas en el estado de Chiapas, finalmente a la Ing. Alondra Gil Ríos, la Lic. Silvia Berenice Lovera Salazar y al Ing. José Piña Flores, por su apoyo en diferentes actividades durante el desarrollo del proyecto.

## REFERENCIAS

- Aguilar-Becerril, H.R., Pérez-Rocha, L.E., Jaramillo-Rivera, A., 2009, Respuesta sísmica del terreno para Hospital bicentenario: Informe técnico Ingenieros Especialistas en Cimentaciones, S.C., México, D.F., 38 pp.
- Aguilar-Becerril, H.R., Pérez-Rocha, L.E., Jaramillo-Rivera, A., 2006, Respuesta sísmica del terreno para Home Depot: Informe técnico Sísmica de Suelos, S.A. de C.V., México, D.F., 46 pp.
- Aguirre-González, J., Rodríguez-González, M., Vázquez-Rosas, R., 2006, Sísmica de dispersión de ondas superficiales usando ruido sísmico. Siete mediciones en el Estado de Colima, México en Congreso Nacional de Mecánica de Suelos, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 22-25 Noviembre 2006, 495-504.
- Aki, K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors: Bulletin Earthquake Research Institute, Tokyo University, 35, 415-457.
- Campillo, M., 2006, Phase and correlation in random seismic fields and the reconstruction of the Green function: Pageoph, 163, 475-501.
- Centro Estatal de Información Estadística y Geográfica, (CEIEG), 2010, Datos estadísticos y geográficos de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, consultado en línea el 19 de diciembre de 2011 en <<http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/home/>>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2008, Manual de Obras Civiles: Diseño por sismo: México, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, 325 pp.
- Chávez-García, F.J., Rodríguez, M., Stephenson, W.R., 2006, Subsoil Structure Using SPAC Measurements along a Line: Bulletin of the Seismological Society of America, 96, 729-736.
- Chávez-García, F.J., Rodríguez, M., Stephenson, W.R., 2005, An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting the stationary of noise: Bulletin of the Seismological Society of America, 95(1), 277-293.
- Flores-Estrella, H., 2004, Método SPAC: Una alternativa para la estimación de modelos de velocidades en el Valle de México: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Tesis de Maestría, 122 pp.
- GEOPSY 2.8.0., 2005, Software libre, <<http://www.geopsy.org/>>
- MATLAB, 2011, The Language of Technical Computing, Software desarrollado por Mathworks, <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>
- Garduño-Monroy, V.H., Chávez-Hernández, J., Aguirre-González, J., Vázquez-Rosas, R., Mijares-Arellano, H., Israde-Alcántara, I., Hernández-Madriral, V.M., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., 2009, Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Michoacán, México, con base en microtremores y estudios de paleosismología: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26(3), 623-637.
- González-Herrera, R., Mora-Chaparro, J.C., Aguirre-González, J., Piña-Flores, J., García-Moreno, L.M., Balcázar-Cundapí, R.M., Lovera-Salazar, S.B., Gil-Ríos, A., De los Santos-Reyes, I., Balbuena-De la Cruz, I.J., Vázquez-Náfate, E., Torrijos-Mora, A., Jiménez-Franco, A., Mijares-Arellano, H., 2012, Microzonificación sísmica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: México, Protección Civil del Estado de Chiapas, 162 pp.
- Narcía-López, C., Aguilar-Carboney, J.A., Ramírez-Centeno, M.S., González-Herrera, R., Cruz-Díaz, R., 2006, El periodo natural de vibración del suelo en la ciudad de Tuxtla, Chiapas: Quehacer científico en Chiapas, 1(1), 22-38.
- Ordóñez-Ruiz, J., 2008, Zonificación geotécnica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: México, Universidad Autónoma de Chiapas, 148 pp.
- Piña-Flores, J., 2012, Distribución espacial de periodos dominantes en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de licenciatura, 107 pp.
- Vázquez-Rosas, R., Aguirre-González, J., Flores-Estrella, H., Mijares-Arellano, H., 2011, Microtremor studies using the SPAC method Experiences and applications to four cities in Mexico: Geofísica Internacional, 50(3), 295-312.
- Yokoi, T., Margaryan, S., 2008, Interpretation of Spatial Autocorrelation Method based on the Theory of Seismic Interferometry, en The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 2008, 8 pp.

Manuscrito recibido: Junio 8, 2012

Manuscrito corregido recibido: Octubre 19, 2012

Manuscrito aceptado: Noviembre 29, 2012