

1a. edición, Abril 1996

◦ SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
◦ CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE
DESASTRES
AV. DELFIN MADRIGAL No. 665, COL. PEDREGAL
SANTO DOMINGO, DELEGACIÓN COYOACÁN, C.P.
04360, MÉXICO, D.F.
TELÉFONOS: 606 98 37, 606 97 39, 606 99 82,
FAX. 606 16 08

◦ Autores: Carlos Gutiérrez M., Kazuaki Masaki,
Javier Lerma, Julio Cuenca.

Edición a cargo de: Carlos Gutiérrez

Derechos reservados conforme a la ley
IMPRESO EN MÉXICO. *PRINTED IN MEXICO*

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional
de Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES
EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS
AUTORES

SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Lic. Emilio Chuayffet Chemor
Secretario de Gobernación

Lic. Juan Ramiro Robledo Ruiz
Subsecretario de Protección Civil y de Prevención
y Readaptación Social

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

Dr. Roberto Meli
Director General

Ing. Shigeharu Morishita
Director del Equipo Asesor Japonés

Dr. Mario Ordaz
Coordinador de Investigación

M. en I. Roberto Quaas
Coordinador de Instrumentación

Lic. Ricardo Cícero Betancourt
Coordinador de Difusión

SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE COLIMA

Carlos Gutiérrez M. ¹

Kazuaki Masaki ²

Javier Lermo ³

Julio Cuenca ³

Informe preparado para el CENAPRED

Área de Riesgos Geológicos

Abril de 1996

1 Centro Nacional de Prevención de Desastres

2 Aichi Institute of Technology, Nagoya, Japón

3 Instituto de Ingeniería, UNAM

CUADERNOS DE INVESTIGACION

P R E S E N T A C I O N

La Coordinación de Investigación del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) realiza estudios sobre las características de los fenómenos naturales y de las actividades humanas que son fuentes potenciales de desastres, así como sobre las técnicas y medidas que conducen a la reducción de las consecuencias de dichos fenómenos.

Las actividades enfocan la problemática de los Riesgos Geológicos (Sismos y Volcanes), de los Riesgos Hidrometeorológicos (Inundaciones, Huracanes, Sequías, Erosión) y de los Riesgos Químicos (Incendios, Explosiones, Contaminación por Desechos Industriales).

Los resultados de los estudios se publican en Informes Técnicos que se distribuyen a las instituciones y los especialistas relacionados con cada tema específico.

En adición a dichos Informes Técnicos de carácter muy especializado, el CENAPRED ha emprendido la publicación de esta serie, llamada CUADERNOS DE INVESTIGACION, con el fin de dar a conocer a un público más amplio aquellos estudios que se consideran de interés más general o que contienen información que conviene quede publicada en una edición más formal que la de los Informes Técnicos.

Los catálogos de Informes Técnicos y de Cuadernos de Investigación, así como las publicaciones específicas pueden obtenerse solicitándolos por escrito a la Coordinación de Investigación del CENAPRED, o pueden consultarse directamente en su Unidad de Información.

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE COLIMA

RESUMEN

Con el propósito de establecer parámetros básicos para la microzonificación sísmica de la ciudad de Colima, se llevó a cabo la observación de microtemores (vibración ambiental) en 57 puntos del área urbana y el registro de 10 sismos de magnitud moderada en sitios de terreno firme y blando, información que fue utilizada para definir líneas de isoperiodos y factores de amplificación, respectivamente.

Adicionalmente, se registraron microtemores a lo largo de una línea de aproximadamente 24 km que cruza el valle, con afloramientos de caliza en sus extremos, lo que permitió reconocer las diferencias principales en espesor y comportamiento dinámico de los materiales.

Finalmente, en dos sitios con litología representativa de la zona con mayor número de asentamientos humanos, se determinaron velocidades de ondas P y S en las capas más superficiales de manera directa, utilizando un sistema de sonda suspendida en dos pozos con profundidad de 50 m, con lo que se pudo proponer un modelo de dos capas para la ciudad.

ABSTRACT

In order to estimate basic parameters for seismic microzoning in Colima city, microtemors were observed at 57 sites in the urban area and 10 moderate magnitude earthquakes were recorded in soft and hard soils, information that was used to define isoperiod lines and amplification factors, respectively.

Additionally, microtemors were recorded along a 24 km line across the valley with limestone outcrops at both edges. It permitted to recognize the main differences in depth and dynamic behavior of the materials.

Finally, at two sites with representative lithology of the zone with the greatest number of human settlements, P and S wave velocities were directly observed using a logging system in boreholes with depths of 50 m; this permitted to propose a two-layer model for Colima city.

CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	5
CONTENIDO	7
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1 MARCO GEOLÓGICO	11
CAPÍTULO 2 DETERMINACIÓN DE AMPLIFICACIÓN RELATIVA	13
2.1 DISTRIBUCIÓN DE INSTRUMENTOS DE REGISTRO	13
2.2 EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS.....	13
2.3 COCIENTES ESPECTRALES Y AMPLIFICACIÓN RELATIVA.....	13
CAPÍTULO 3 MAPA DE ISOPERIODOS PARA LA CIUDAD DE COLIMA	15
3.1 PROCEDIMIENTO DE OBSERVACIÓN DE MICROTREMORES.....	15
3.2 ANÁLISIS DE MICROTREMORES Y LÍNEAS DE ISOPERIODOS.....	15
3.3 ESTACIONARIEDAD DE MICROTREMORES.....	16
CAPÍTULO 4 MICROTREMORES A TRAVÉS DEL VALLE DE COLIMA	19
4.1 INTRODUCCIÓN.....	19
4.2 PROCEDIMIENTO DE OBSERVACIÓN.....	19
4.3 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	19
CAPÍTULO 5 OBTENCIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P y S MEDIANTE SONDA SUSPENDIDA	21
5.1 INTRODUCCIÓN.....	21
5.2 POZOS PARA SONDEOS EN EL ÁREA URBANA.....	21
5.3 SISTEMA DE SONDA SUSPENDIDA.....	21
5.4 MODELO DE VELOCIDADES.....	22
CONCLUSIONES	23
REFERENCIAS	25
RECONOCIMIENTOS	27
TABLAS	29
FIGURAS	33

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Colima se encuentra cercana a una de las principales zonas sismogénicas de nuestro país, que es la región costera de Jalisco y Colima. Aunque su nivel de sismicidad no llega a ser como el de Guerrero, la región tiene un potencial sísmico alto. Durante este siglo se han producido sismos de gran magnitud en esa región tales como los del 3 y 18 de junio de 1932 con magnitudes 8.2 y 7.8, respectivamente, 15 de abril de 1941 (M 7.7), 30 de enero de 1973 (M 7.5) y recientemente el 9 de octubre de 1995 (M 7.9). Cabe señalar que el primero de ellos está considerado como el de mayor magnitud en México durante el presente siglo (Singh *et al.*, 1985). Esto ha mostrado la necesidad de que las grandes ciudades cercanas a zonas de alto potencial sísmico, por ejemplo Colima y Guadalajara, cuenten con información relativa al comportamiento dinámico del suelo en el cual se encuentran, estableciendo áreas con diferentes grados de riesgo por sismos de gran magnitud, lo cual se conoce como microzonificación sísmica.

Uno de los procedimientos más conocidos para la microzonificación sísmica, en este caso aplicado en la ciudad de Colima, es el registro y análisis de vibración ambiental o microtemores, en un número considerable de puntos en el área de interés para la configuración de un mapa con curvas de igual período dominante, cuyos valores puntuales se obtienen de los espectros de amplitud o de potencia de las señales registradas. Asimismo, se cuantifica la amplificación relativa del movimiento sísmico en suelos blandos con respecto a suelo firme mediante el análisis de eventos de moderada o gran magnitud obtenidos con sismógrafos o acelerógrafos (Lermo *et al.*, 1988; Gutierrez y Singh, 1992).

En este caso, se llevaron a cabo observaciones complementarias de microtemores a lo largo de una línea de 24 km que cruza el Valle de Colima y la medición de velocidades de ondas P y S, mediante sonda suspendida, para las capas más superficiales de los depósitos de avalancha volcánica, una de las formaciones geológicas predominantes en el valle.

CAPÍTULO 1

MARCO GEOLÓGICO

Colima está situada dentro del graben de Colima que, junto con el graben de Zacoalco y el de Chapala, puede constituir un incipiente punto triple (Lurh y Carmichael, 1981). Dentro del graben de Colima se ha mantenido un nivel alto de actividad volcánica, cuyo rasgo más sobresaliente es el Volcán de Fuego, considerado como uno de los más activos de México y que está situado al norte de la ciudad de Colima.

La ciudad se encuentra sobre una meseta, ubicada entre el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, ligeramente inclinada hacia el suroeste (Silva y Esquivel, 1976). Los materiales sobre los que se asienta la zona urbana son (Fig 1.1):

- Conglomerados, principalmente en la parte este de la ciudad.
- Intercalaciones de arenas y conglomerados, superficialmente intemperizados aunque con mayor cohesión a medida que aumenta la profundidad, predominantes en la parte oeste del área urbana
- Aluviones, producto básicamente del acarreo de ríos, depositados en el sur de la ciudad, utilizados principalmente con fines agrícolas.
- Brecha volcánica andesítica, sobre la que se han desarrollado la mayor parte de las obras civiles y se concentra más del 50 % de la población, se extiende principalmente en la parte norte. Debido a condiciones climáticas relativamente favorables, la ciudad tiende a crecer hacia la parte norte, sobre estos depósitos

El espesor total de los depósitos de avalancha volcánica, debajo de la ciudad, puede llegar a ser hasta de 700 m, según estudios geológicos (Navarro y Cortez, Univ. de Colima, comunicación personal) y geofísicos (López y Gutiérrez, 1977). Estos depósitos sobreyacen calizas del cretácico, formación basal importante en el Valle de Colima, que afloran en localidades cercanas tales como Zacualpan y el cerro La Cumbre

CAPÍTULO 2

DETERMINACIÓN DE AMPLIFICACIÓN RELATIVA

2.1 DISTRIBUCIÓN DE INSTRUMENTOS DE REGISTRO

Para el registro de los eventos sísmicos que fueron empleados en la evaluación de los factores de amplificación, se utilizaron, durante julio y agosto de 1994, sismógrafos digitales EDA con memoria de estado sólido y sensores Lennartz, con tres componentes ortogonales y periodo natural $T_0 = 1$ s. Para la instalación de estos instrumentos se tomaron en cuenta los distintos tipos de terreno así como la tendencia de expansión del área urbana. Se seleccionaron ocho sitios para la instalación de los sismógrafos (ver Fig 1.1). La estación empleada como base de comparación se ubicó en el cerro La Cumbre, considerado el sitio más firme cercano a la ciudad

2.2 EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS

Con la instrumentación descrita fue posible registrar, simultáneamente en sitios de la ciudad y en La Cumbre, diez sismos con magnitudes M_c entre 3.2 y 4.5 (Tabla 2.1). Los epicentros de estos eventos y sus correspondientes series de tiempo se muestran en las Figs 2.1 y 2.2, respectivamente. La mayoría de los sismos se concentraron en la parte continental en un radio no mayor a 50 km de la ciudad y con profundidades hasta de 27 km. El evento más lejano (evento 1) se localizó aproximadamente a 370 km, siendo uno de los de mayor magnitud y mayor profundidad.

Existe un estudio previo de amplificación relativa para la ciudad de Colima para el que se eligió un sitio de referencia distinto, sobre depositos volcanicos (Lermo *et al.*, 1991) Se logró hacer estimaciones de amplificación relativa para 4 sitios del área urbana empleando un sismo de magnitud 3.5. Sin embargo, se consideró importante verificar y complementar esos resultados empleando un nuevo sitio de referencia con las características geológicas de La Cumbre

2.3 COCIENTES ESPECTRALES Y AMPLIFICACIÓN RELATIVA

Se calcularon espectros de amplitud de Fourier para los paquetes de ondas S y de coda de S para todos los sismos registrados. Asimismo, para estimar factores de amplificación relativa en sitios de la ciudad, se calcularon los cocientes espectrales empleando como referencia los espectros de eventos registrados en La Cumbre (Fig 2.3).

De los 7 sitios instrumentados en la ciudad, puede afirmarse que sólo para 4 se logró una estimación relativamente confiable del comportamiento característico del terreno, en vista de que en ellos se registraron entre 3 y 6 eventos. Estos sitios son Rancho Amezcuca (RA), Universidad de Colima (UC), zona Centro-Este (CE) y San Cayetano (CAY), el primero de ellos sobre aluvión y el resto sobre brecha andesítica. En las otras estaciones sólo un evento fue registrado de manera simultánea.

Para un evento determinado, las formas de los espectros de ondas S y de coda de S, al igual que de los cocientes espectrales, tienen gran similitud. Esto ocurre en un buen número de casos. Las frecuencias dominantes para cada sitio fueron estimadas a partir de los cocientes espectrales buscando la coherencia de máximos en ambos tipos de cocientes. En términos generales, los factores de amplificación no son superiores a 6, para ondas S mientras que para coda de S, éstos llegan hasta 9 (Tabla 2.2). Para lo anterior, se consideraron frecuencias superiores a 1 Hz ya que la respuesta de los instrumentos para frecuencias inferiores no es uniforme.

Los valores de amplificación resultaron relativamente reducidos en comparación con otros casos en donde la amplificación para suelos blandos se encuentra entre 8 y 56 veces (Singh *et al.*, 1988; Gutiérrez y Singh, 1992).

CAPÍTULO 3

MAPA DE ISOPERIODOS PARA LA CIUDAD DE COLIMA

3.1 PROCEDIMIENTO DE OBSERVACIÓN DE MICROTREMORES

El análisis espectral de microtremores ha sido ampliamente usado en Japón y otros países para evaluar los periodos dominantes del terreno. Hace pocos años este método fue aplicado en la Ciudad de México con fines de microzonificación, observándose buena correlación entre los máximos en espectros de microtremores y aquellos de espectros de aceleración (Lermo *et al.* 1988). Se puede afirmar que, cuando el contraste de impedancia acústica entre la roca basal y depósitos blandos sobreyacentes es alto, los periodos dominantes del terreno que se presentan durante movimientos sísmicos intensos, pueden ser determinados empleando el análisis espectral de microtremores. En el caso del Valle de Colima, de acuerdo a la información geológica y geofísica, se espera que dicho contraste sea más bien bajo.

Tomando en cuenta lo anterior, se llevó a cabo una campaña de observación de microtremores en zonas urbanas y suburbanas con el propósito de estimar, con la mayor precisión posible, las principales diferencias de la respuesta del terreno ante el movimiento sísmico.

Las mediciones fueron hechas en 57 sitios a lo largo de 5 líneas con orientación aproximada NW-SE, cruzando enteramente la ciudad, alternando dos sistemas digitales de adquisición de datos, con sensores de tres componentes ortogonales y periodos naturales de 1 y 5 s, respectivamente.

Las señales de microtremores fueron observadas durante 90 segundos, empleando una frecuencia de muestreo de 50 Hz, siempre buscando evitar efectos de fuente causados por el tránsito cercano de personas y vehículos o maquinaria en uso.

3.2 ANÁLISIS DE MICROTREMORES Y LÍNEAS DE ISOPERIODOS

Para el cálculo de espectros de amplitud de Fourier se empleó, en la mayoría de los casos, la ventana completa de la señal. Sin embargo, debido a la presencia de señales espurias, en algunas ventanas sólo se consideró una tercera parte.

En las Figs 3.1 y 3.2 se presentan las series de tiempo de microtremores y los espectros de amplitud para el componente norte-sur, respectivamente (ambos componentes horizontales mostraron comportamientos muy similares). Los máximos espectrales asociados a las frecuencias dominantes, no se presentan generalmente con buena definición por lo que, para construcción del mapa de isoperiodos se consideró la tendencia general de las formas espectrales (Fig 3.3).

Las líneas de isoperiodos no siguen estrictamente la distribución de los depósitos superficiales como podría haberse esperado de acuerdo a la relación directamente proporcional espesor-periodo. No obstante, puede verse que la porción de conglomerado arenoso, en la parte suroeste de la ciudad, concentra los periodos más largos.

En el análisis de microtemores realizado por Lermo *et al.* en 1991, se reportan valores de periodos dominantes para 35 puntos ubicados en dos líneas que cruzan casi perpendicularmente la ciudad. No en todos los casos coinciden los valores con los que aquí se reportan, probablemente por diferencias en criterios de evaluación o señales poco representativas del comportamiento natural del terreno. La diferencia más grande es que durante esta campaña de observación no se encontraron periodos cercanos a 2 s en los extremos este y sur de la ciudad, como se reporta en el estudio anterior

3.3 ESTACIONARIEDAD DE MICROTREMORES

Puesto que los microtemores son producto principalmente de la actividad humana, si las fuentes de vibración se encuentran distribuidas al azar en un área considerable, la amplitud y la frecuencia de la señal observada estarán esencialmente determinadas por la estructura del subsuelo. El conocer el grado de variabilidad de las amplitudes espectrales y de las frecuencias asociadas a sus máximos con respecto al tiempo, en un sitio dado, es de particular importancia para los estudios de microzonificación. Normalmente, se espera que la frecuencia dominante no cambie con el tiempo, de lo contrario los resultados del análisis de microtemores podrían considerarse poco confiables

Se eligió, como sitio representativo para una prueba de estacionariedad de microtemores, el sitio Centro-Este, en el que se hicieron observaciones, con sensores de 5 s, durante 24 horas con intervalos de una hora. En los espectros calculados se identifican dos frecuencias dominantes de 0.3 y 3.5 Hz, observándose cambios notables sólo en ésta última, especialmente entre las 6 y 21 horas (Figs 3.4 y 3.5).

La diferencia más importante, al igual que en otros lugares donde se han realizado pruebas similares, es que las amplitudes a media noche son mucho más pequeñas que durante el día, lo cual está directamente relacionado al número de fuentes activas en cada periodo de observación.

Para la frecuencia de 0.3 Hz, las amplitudes no presentan una variación notable a través del tiempo. Se pueden plantear dos posibilidades para explicar este máximo. Una, que se considera la más razonable, es que se trate de microsismos presentes en prácticamente cualquier lugar, y cuyo origen se atribuye al oleaje marino (Hatherton, 1960). La frecuencia típica de los microsismos reportada a nivel mundial es de 0.2 Hz; sin embargo, pueden esperarse algunos cambios debido a diferencias en los patrones de oleaje. Puesto que la ciudad de Colima se encuentra cerca del mar, es razonable esperar efectos en los espectros de amplitud como los descritos

CAPÍTULO 3

Por otra parte, la posibilidad de que este máximo se deba a microtemores con origen artificial se considera lejana, especialmente si se toma en cuenta que la circulación de vehículos en la ciudad es relativamente reducida al igual que la actividad industrial.

CAPÍTULO 4

MICROTREMORES A TRAVÉS DEL VALLE DE COLIMA

4.1 INTRODUCCIÓN

Se consideró que una parte complementaria importante de la microzonificación de la ciudad sería el reconocimiento de las diferencias en amplitudes espectrales y frecuencias dominantes de los materiales depositados en el Valle de Colima respecto de sitios firmes a los lados de este, para lo cual se llevó a cabo el registro de microtremores a lo largo de una línea que cruza el valle, entre el sitio de La Cumbre y el poblado Zacualpan.

4.2. PROCEDIMIENTO DE OBSERVACIÓN.

La línea fue planeada para cruzar el valle en dirección SE-NW y que sus extremos se ubicaran en sitios firmes, en este caso afloramientos de caliza. La longitud total de la línea es de casi 24 km, incluyendo 25 sitios de medición con separación promedio de 1 km. El sitio 1 es el punto de referencia en la parte alta del cerro La Cumbre, a unos 6 km al SSE de la ciudad. El sitio 25 se localiza muy cerca del poblado Zacualpan (Fig 4.1). Durante las observaciones, los sensores se colocaron preferentemente sobre terreno natural, aunque en algunas ocasiones fue sobre áreas pavimentadas, evitando al máximo la contaminación de la señal por fuentes cercanas, algo difícil en el centro de la ciudad. La frecuencia de muestreo fue de 50 Hz y la longitud de grabación de 180 s.

Tomando en cuenta que el Volcán de Fuego de Colima se encuentra en la parte norte de la ciudad y que la distribución de los depósitos de avalancha se han presentado con un patrón radial, se puede esperar que éstos tengan espesores mayores hacia el centro de la línea de observación ya mencionada.

4.3 ANÁLISIS Y RESULTADOS

El cálculo de espectros de Fourier se realizó empleando ventanas de 30 segundos de duración. Las señales correspondientes a los sitios 1 a 25 y sus espectros se muestran en las Figs 4.2 y 4.3, respectivamente. Casi en todos los espectros mostrados también está presente un pico en 0.3 Hz, que puede deberse a microsismos, como ya se mencionó.

Los espectros de microtremores, al igual que para la ciudad, no muestran muy claramente, aparte del pico en 0.3 Hz, una frecuencia dominante que pueda ser fácilmente relacionada con la estructura del terreno. Se pueden considerar tres aspectos fundamentales para explicar la falta de definición de máximos en los espectros:

a) Los depósitos tienen una distribución compleja en función de la profundidad y contrastes bajos de impedancia acústica.

b) La fuente de energía es insuficiente para excitar completamente las formaciones geológicas del valle.

c) Los picos que caracterizan el comportamiento del terreno son enmascarados por ruido.

Las amplitudes en los primeros cuatro sitios son pequeñas, correspondiendo a terreno firme. El punto 5 tiene mayores amplitudes aunque su periodo es similar a los de sitios anteriores, sugiriendo que el espesor del aluvión es reducido. Los sitios 6, 7 y 8 se encuentran en un área de transición dentro de la ciudad, por lo que puede esperarse que las señales estén afectadas por fuentes locales. Las amplitudes en estos puntos cambian enormemente, mientras que sólo para el punto 7 fue posible determinar confiablemente un periodo dominante.

Ya que el periodo más largo se encontró en el punto 16, junto con un aumento importante de las amplitudes, el cuerpo de conglomerado arenoso podría tener en este sitio su mayor espesor. Las amplitudes en los sitios 24 y 25, cercanos a Zacualpan y localizados sobre conglomerados de poco espesor que sobreyacen a las calizas, son más bien reducidas aunque mayores en comparación con las de 1 y 4, lo cual puede estar ocasionado por la actividad humana cercana.

CAPÍTULO 5

OBTENCIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S MEDIANTE SONDA SUSPENDIDA.

5.1 INTRODUCCIÓN

Un procedimiento alternativo para analizar la respuesta del terreno requiere, al menos, de los espesores de las capas y sus correspondientes velocidades de ondas P y S. Para obtener tales datos pueden observarse microtemores mediante arreglos instrumentales, o bien realizar perfiles de refracción usando explosiones. Sin embargo, tales velocidades pueden obtenerse utilizando sonda suspendida a lo largo de un pozo perforado en un sitio cuya litología sea representativa del área en estudio. Este método permite obtener datos mucho más precisos, aunque resulta ser altamente costoso, lo que limita su aplicación repetida en un área determinada. Por tanto, es recomendable aplicar los métodos mencionados de manera combinada para así tener una apreciación general de las características del terreno de manera razonablemente confiable.

5.2 POZOS PARA SONDEOS EN EL ÁREA URBANA

El sistema de sonda suspendida fue usado en dos sitios separados 2.5 km, dentro de la ciudad, Universidad de Colima y el Fraccionamiento Santa Bárbara, este último muy cercano a San Cayetano, lugares donde fueron colocados sismógrafos digitales (Fig 5.1). La litología en tales sitios (depósitos de avalancha volcánica) se considera representativa de gran parte del área urbana de Colima.

La profundidad de cada uno de los pozos fue de 50 m y su diámetro de 12.5 cm. Los materiales encontrados durante la perforación son predominantemente tobas y brechas, estas últimas a partir de 10 m y 30 m de profundidad para los sitios de Santa Bárbara y Universidad de Colima, respectivamente. Tales materiales continúan hasta unos 700 m de profundidad, de acuerdo con datos de geología, geofísica e información estratigráfica de pozos con profundidades mayores que 100 m (Orozco *et al.*, 1976).

5.3 SISTEMA DE SONDA SUSPENDIDA

Se utilizó un sistema de sonda como el mostrado en la Fig 5.2, el cual cuenta con una fuente de ondas P y S así como dos geofonos integrados en el mismo cuerpo, con una separación de 1 m entre sí, los cuales reciben la señal producida por la fuente después de viajar a lo largo de la pared del pozo. El tiempo de viaje de las ondas es obtenido de la diferencia en arribos en los

geofonos, así, considerando la separación unitaria entre estos se calcula la velocidad de los materiales y se asigna a la profundidad del punto medio entre geófonos

5.4 MODELO DE VELOCIDADES

Las mediciones de velocidad, realizadas a intervalos de un metro, muestran distribuciones que se presentan en la Fig 5.3 para ambos pozos, en las que se nota un cambio bien marcado de las velocidades de ondas S a partir de 20 m, presentando valores entre 500 y 750 m/s. Para el pozo Santa Bárbara no se tienen datos de velocidad sino hasta los 10 m de profundidad debido a la gran incertidumbre en la definición de arribos, tanto de ondas P como de S. La causa de tal fenómeno puede ser la gran dispersión de la señal de la fuente debido a grandes heterogeneidades en la granulometría, observadas en muestras de perforación.

Aunque el cambio de velocidades cercano a los 20 m no corresponde precisamente a una frontera litológica reportada durante la perforación, pone en evidencia un cambio en la densidad de los materiales

Considerando lo anterior y asumiendo que la mencionada frontera se extiende en todo el cuerpo de brecha volcánica, puede plantearse un modelo de velocidades de dos capas para cada sitio. En la Universidad, para la primera capa se tomaría un promedio de 500 m/s, mientras que en Santa Bárbara éste sería de 220 m/s. En ambos casos a la capa inferior se le asigna una velocidad de 600 m/s

Empleando la relación $f_n = V_s/4H$ y el valor de $f_n = 3.5$ Hz, obtenido de la prueba de estacionariedad en un punto entre los dos pozos, el espesor H para la primera capa resulta ser de 16 y 36 m, para Santa Bárbara y la Universidad, respectivamente: valores alrededor de la profundidad del cambio significativo de velocidades. Esto puede indicar gruesamente las variaciones que pueden esperarse en el espesor y la velocidad de la primera capa, dentro de la ciudad.

Por otra parte, tomando en cuenta la frecuencia dominante de 0.3 Hz, también obtenida de la prueba de estacionariedad, y que la velocidad generalmente aumenta con la profundidad por lo que la velocidad de la brecha andesítica podría ser hasta de 1000 m/s a profundidades cercanas a la caliza, la relación usada anteriormente da una profundidad de 833 m, la cual resulta semejante a las estimaciones geológicas y geofísicas (700 m)

En consecuencia, un modelo general para el área, debe comprender, para la primera capa, velocidades y espesores en rangos aproximados de 220 a 500 m/s y de 16 a 36 m, respectivamente. La segunda capa puede definirse hasta una profundidad cercana a los 800 m, con velocidad de 600 m/s a poca profundidad y aumentando hasta 1000 m/s cerca del contacto con las calizas subyacentes.

CONCLUSIONES

Se tiene una estimación razonable de la amplificación relativa para cuatro sitios de la ciudad de Colima. Para otros tres sitios se obtuvieron valores de amplificación usando solamente un sismo. Los factores de amplificación son hasta de 6 en el caso de ondas S y 9 para ondas de coda de S.

En la mayoría de los espectros de microtemores es difícil encontrar, a diferencia de otros casos, un pico claramente definido que permita identificar el periodo dominante. El mapa de isoperiodos se elaboró siguiendo el carácter general de la información al encontrarse inconsistencias. Los periodos más largos, con valores hasta de 0.3 s, se concentraron en la zona suroeste del área urbana. Ya que la ciudad de Colima es pequeña y su nivel de actividad reducido, se piensa que la fuente de energía es insuficiente para excitar completamente los depósitos volcánicos, obteniéndose una definición pobre de las frecuencias dominantes.

Para la línea La Cumbre-Zacualpan se obtuvo una estimación general de espesores relativos y periodos dominantes entre 0.15 y 0.6 s. La presencia de mayores amplitudes y periodos en el centro de la línea sugiere que el espesor de los depósitos es mayor hacia la parte media del valle.

Se perforaron dos pozos con profundidades de 50 m en brechas volcánicas. Un cambio significativo de velocidades de onda S se observó aproximadamente a 20 m que, junto con un valor característico de f_0 , permite proponer un modelo de velocidades de dos capas para la ciudad. Éste incluye, para la primera capa, velocidades y espesores en rangos aproximados de 220 a 500 m/s y de 16 a 36 m, respectivamente. La segunda capa puede considerarse con velocidad entre 600-1000 m/s, hasta una profundidad de 800 m.

No obstante que el valle ha sido cubierto principalmente con materiales volcánicos depositados con patrones complejos, los resultados en general se muestran coherentes con datos geológicos y geofísicos, por lo que se considera que los métodos aplicados fueron útiles para la caracterización de esta región.

REFERENCIAS

1. Gutiérrez, C. and Singh, S.K. , "A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of results of strong motion and microtremor data". *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 82, No. 2, 1992, pp 642-659.
2. Gutiérrez C., Nava, E., Singh, S.K., Vargas, W., Hernández, F. y Taylor, W. "Análisis de efectos de sitio en el área de Puerto Limón, Costa Rica, usando sismogramas digitales". Informe interno, CENAPRED, 1992.
3. Hatherton, T. "Microseisms at Scott Base". *Geophys. Jour. of the Royal Astr. Soc.* Vol. 3, No. 4, 1960.
4. Lermo J., Díaz de León, J., Nava, E. y Macías, M. "Estimación de periodos dominantes y amplificación relativa del suelo en la zona urbana de Colima". IX Congreso de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima, 1991.
5. Lermo J., Rodríguez, M. and Singh, S.K. "Natural periods of sites in the Valley of Mexico from microtremor measurements". *Earthquake Spectra*, Noviembre 4-4; 1988, pp 805-814.
6. López H. y Gutiérrez, C. "Pseudosecciones eléctricas e implicaciones geohidrológicas en el Valle de Colima". *Geofísica Internacional*, Vol. 17, Núm. 2, 1977.
7. Lurh, J.F. and Carmichael, I.S.E. "The Colima volcanic complex Mexico: Part II. Late quaternary cinder cones". *Contrib. Mineral Petrol.*, Vol. V. 76, 1981, 127-147.
8. Orozco, J.M., Fernández , C y Preciado, P. "Colima, Col. Memorias de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos", Tomo V, 1976.
9. Silva, C. y Esquivel, R. Colima, "Col. Memorias de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos", Tomo II, 1976.
10. Singh, S.K., Ponce, L. and Nishenko, S.P. "The great Jalisco, Mexico earthquakes of 1932: subduction of the Rivera plate". *Bull. Seism. Soc. Am.* 75, 1985, pp 1301-1313.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece el apoyo de todos los miembros del Centro Universitario de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad de Colima (CUICT) para llevar a cabo estos estudios. Particularmente, se reconoce el apoyo del Dr. Ignacio Galindo para la organización y realización de todas las actividades del proyecto. La participación de los ingenieros Carlos Navarro y Abel Cortez, investigadores del CUICT, en los estudios de campo fue de especial importancia. Asimismo, contribuyeron con valiosa información acerca de la geología de Colima.

Los autores reconocen la colaboración del M. en C. Gabriel Reyes y del Ing. Ariel Ramírez, investigadores de la Coordinación de Ciencias Básicas de la Universidad de Colima, en las actividades de campo y particularmente en la localización de los sismos analizados en este trabajo.