



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE
LÁZARO CÁRDENAS MICHOACÁN UTILIZANDO
EL MÉTODO DE NAKAMURA

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN
DEL TERRITORIO

PRESENTA:

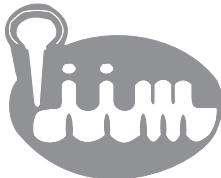
GERARDO GARCÍA RANGEL

DIRECTOR DE TESIS:

DR. VÍCTOR HUGO GARDUÑO MONROY

COASESOR:

DR VÍCTOR MANUEL HERNANDEZ MADRIGAL



MORELIA, MICHOACÁN

AGOSTO DEL 2009

AGRADECIMIENTOS

A un poder superior a mis capacidades	por darme la existencia, salud y los medios para lograr un propósito más en la vida que sea benéfico también para la sociedad
A mis padres Alfonso García Vargas y Ana María Rangel Garnica	por la vida, educación, confianza, ayuda incondicional y por todo.
A mis hermanos Ernesto y Alfonso	por su ánimo, apoyo y comprensión.
A mi novia Evelyn Tínoce Velázquez	por su compañía, comprensión y tolerancia.
A mí asesor y profesor Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy	por sus enseñanzas académicas y sociales, su ejemplo, guía, motivación, asesoría en los trabajos y proyecto de tesis, apoyo total y respetuosa amistad.
Al Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal	por sus conocimientos, orientación, confianza, vínculo amistoso, apoyo antes y durante mi estancia en la maestría y en especial en la revisión de tesis y culminación de los trabajos.
Al M.C. José Chávez Hernández	por la transmisión de sus conocimientos referente a los trabajos realizados de microzonificación, apoyo desinteresado desde mi ingreso a la maestría, amistad y compañerismo.
Al M.C. Ricardo Vázquez Rosas del Instituto de Ingeniería de la UNAM	Agradecimientos especiales por su valiosa enseñanza, asesoría, guía principal en la realización de trabajos, instrumentación y procesado de datos, así como labor de asesor.
Al Dr. Jorge Aguirre González del Instituto de Ingeniería de la UNAM	Por el apoyo brindado con del Instituto de Ingeniería de la UNAM
A mis profesores de la Maestría: Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal Dra. Isabel Israde Alcántara Dr. Pedro Corona Chávez Dr. Mikhail Ostroumov Fink Dr. Avto Gogichaishvili Dr. Gerardo Héctor García Estrada	por su dedicación e interés en la educación de alumnos en el área de Geociencias así como por su contribución en mi formación académica y mejoramiento de criterios por medio de sus clases, recomendaciones, ejemplos de disciplina, de trabajo y de ética profesional aplicados con calidad humana.
A la Dra. Erna Martha López Granados	por su entusiasmo, comentarios, revisión de tesis y recomendaciones
Al Dr. Manuel Jara Díaz del Postgrado en Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH	por la revisión de tesis, disposición, aportación de conocimientos, y por la contribución en mi formación académica de comportamiento estructural en la maestría de Estructuras.
Al Dr. Guillermo Martínez Ruíz del Postgrado en Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH	por su disposición, facilitación de información referente a trabajos con el método de Nakamura, sus comentarios, transmisión de conocimientos y contribución en mi formación académica en la materia de cimentaciones, en la maestría de Estructuras.
Campus UNAM Morelia, Geografía (CIGA)	por la capacitación en sus instalaciones y programa de postgrado.
Director, personal académico, administrativo del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas en especial a la Sra. Bertha	por su amistad y motivación de seguir adelante.
Familia Vázquez Chávez	por brindar su núcleo familiar, apoyo moral en la licenciatura y en la actualidad, interés y motivación en mi bienestar.
Compañeros y conocidos en la Maestría: Víctor Hugo Medina, Luis Alberto Verduzco, Diana, Vero, Sugey, Mónica, Magda, Edmundo, Niccolò, Alba y Neftaly	por su compañerismo y amistad.
Autoridades y personal de la ciudad Lázaro Cárdenas: Protección civil, Dirección de Obras Públicas y Desarrollo Urbano, Capalac, Plantas tratadoras de Aguas Residuales I y II, Regidores del H. Ayuntamiento, SEMARNAT-CONAGUA, Administración Portuaria Integral, Laboratorio de Mecánica de suelos (Profesor Bimvela), CFE C.T. Pde Plutarco Elías Calles en Petacalco, Guerrero.	
A la UMSNH por el apoyo en el proyecto.	
Al CONACYT, apoyo al proyecto 25529/CB-2005-01-51506 "Estudio de Paleosismología, Paleolicuefacción y Geofísico en las fallas E-W de las depresiones lacustres de Zacapu, Pátzcuaro y Chapala, México.	

ÍNDICE

Resumen	5
I. Introducción	6
II. Marco teórico	7
III. Antecedentes	11
IV. Justificación	30
V. Objetivos	31
VI. Hipótesis	32
VII. Descripción del área de estudio	33
VIII. Materiales y métodos	39
IX. Resultados y discusión	50
X. Conclusiones y recomendaciones	56
XI. Bibliografía	58
Anexos	62

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
Figura 1.- Visión de la estructura en capas de la Tierra.	8
Figura 2.- Mosaico de las placas rígidas que constituyen la envuelta externa de la tierra.	8
Figura 3- Algunas fuentes sísmicas.	10
Figura 4- Sismicidad en México.	12
Figura 5.- Sismicidad (Enero, 1990-Julio, 2005)	14
Figura 6.- Mapa de regionalización sísmica de la República Mexicana.	15
Figura 7.- Mapa de zonificación sísmica de Michoacán adaptada del Reglamento de Construcciones del Estado, 1986.	16
Figura 8.- Mapa de zonificación sísmica de Michoacán adaptada del Reglamento de Construcciones del Estado, 1999.	16
Figura 9.- Mapa de propuesta de rezonificación sísmica del Estado (Sánchez-Garcilazo, 2000).	17
Figura 10. Mapa de isosistas de eventos sísmicos de los años 1850 a 1985.	18
Figura 11.- Esquema de los dos grupos principales de los métodos para la evaluación del efecto de sitio.	20
Figura 12.- Algunas fuentes generadoras de microtemores.	22
Figura 13.- Ejemplo de registros en terreno duro y blando utilizado por la Técnica de Nakamura.	22
Figura 14.- Efecto de la altura de un edificio ante la acción de una fuerza horizontal de un evento sísmico.	26
Figura 15.-Sección esquemática de algunas estaciones que registraron el sismo de Michoacán en 1985	27
Figura 16.- Localización del área de estudio dentro del contexto urbano de la ciudad de Lázaro Cárdenas.	33
Figura 17.- Incremento de población y vivienda en Lázaro Cárdenas, Mich. (INEGI, 2005)	34
Figura 18.- Infraestructura del transporte (INEGI, cartas topográficas escala 1:50 00 y 1:250 000)	35
Figura 19.- Mapa geodinámico de la región de Michoacán.	36
Figura 20. Campo de esfuerzos del estado de Michoacán ligado a la sismicidad.	37
Figura 21.- Geología (INEGI, conjunto de datos Geográficos de la carta geológica escala 1:250 000)	38
Figura 22.- Vista del interior del acelerógrafo Altus Digital Recorder, modelo K2, KINEMATRICS.	39
Figura 23.- Vista de la parte superior del Sensor EpiSensor triaxial.	39
Figura 24.- Vista frontal del GPS tipo navegador, marca Garmin, modelo plus III.	40
Figura 25.- Brújula tipo Brunton.	40
Figura 26.- Vista frontal de la computadora portátil.	40
Figura 27.- Metodología general, en la microzonificación sísmica de Lázaro Cárdenas, Michoacán.	41
Figura 28.- Ubicación de los 83 puntos de registro de microtemores, en el área de estudio.	43
Figura 29.- Identificación de los puntos de registro, colocación de sensor y registro en campo.	45
Figura 30.- Colocación del sensor, orientación hacia el norte y nivelación.	46
Figura 31.- Muestra de la lectura de datos de los microtemores para el punto número 01	46
Figura 32.- Tres formas diferentes para seleccionar las once ventanas para determinar los cocientes (H/V)	47
Figura 33.- Ejemplo de la obtención de los cocientes espectrales de amplitudes Fourier (H/V)	47
Figura 34.- Ejemplo de gráficas de los cocientes espectrales de amplitudes Fourier (del punto 01)	48
Figura 35.- Determinación de frecuencia dominante y su respectivo período a partir de los cocientes (H/V)	49
Figura 36.- Gráfico de los tres cocientes espectrales de amplitudes (H/V) correspondientes al punto 12	50
Figura 37.- Gráfico de cocientes espectrales de amplitudes (H/V) con dos amplitudes características.	51
Figura 38.- Gráfico de cocientes espectrales de amplitudes (H/V) sin amplitud notoria para definir período	51
Figura 39.- Mapa de isoperíodos para la zona urbana de Lázaro Cárdenas Michoacán.	53
Figura 40.- Mapa tridimensional de los periodos dominantes de la ciudad de Lázaro Cárdenas Michoacán.	54

LISTA DE TABLAS

T A B L A	Página
Tabla 1.- Promedio anual de temblores en el mundo.	12
Tabla 2.- Del catálogo de temblores de gran magnitud en México del siglo XIX y XX	13
Tabla 3.- Temblores cerca de Lázaro Cárdenas 2006-2008, (SSN).	13
Tabla 4.- Magnitud de los 2835 sismos registrados entre las costas de Michoacán, Guerrero y Colima entre Enero de 1990 y Julio del 2005	14
Tabla 5.- Ejemplos de frecuencias y periodos para edificios (modificado de UNESCO RAPCA)	26
Tabla 6.- Periodos dominantes del terreno, punto, coordenadas UTM y la frecuencia correspondientes	52
Tabla 7.- Ejemplos de frecuencias y periodos para edificios (modificado de UNESCO RAPCA)	55

“Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Lázaro Cárdenas Michoacán, utilizando el método de Nakamura”

RESUMEN

La ciudad de Lázaro Cárdenas (LC) se encuentra en el sector meridional de la costa del estado de Michoacán, dentro de una de las zonas más sísmicas del país en la que se han originado los sismos de mayor magnitud en la historia de México, como el sismo de 1985 que causó graves daños en la ciudad de México. Entre los años de 1980 a 2000, y en respuesta a un progreso comercial e industrial de la Siderúrgica y Puerto Internacional, esta ciudad presentó crecimientos de 275% y de 332%, en población y vivienda respectivamente. Por lo anterior, la ciudad de LC es cada vez más vulnerable a la actividad sísmica, por lo que es conveniente tener estudios sobre el comportamiento dinámico del terreno que permitan identificar zonas de mayor susceptibilidad al movimiento sísmico.

Debido a lo anterior, se realizó la microzonificación sísmica de LC aplicando el método de Nakamura, que se basa en los cocientes espectrales de amplitudes de Fourier de microtremores. Mediante un acelerógrafo Altus Digital Recorder, modelo K2, y un sensor EpiSensor triaxial, se registró la vibración ambiental durante 15 minutos, en 83 puntos distribuidos estratégicamente en la ciudad, a partir de los cuales se obtuvieron los periodos dominantes del terreno.

Los resultados obtenidos muestran que en LC, dichos periodos varían de entre 0.0238s y 0.3471s. Con base en la relación calidad del terreno-periodo dominante, en la ciudad se distinguen tres clases de terreno: terreno muy firme con periodos de 0.0238s a 0.1s, que coincide con el periodo natural de construcciones de un nivel; terreno medianamente firme (0.1s-0.2s), coincidente con el periodo de obras civiles de dos niveles; y finalmente, terreno poco firme con periodo dominante de 0.2s a 0.3471s.

Debido a que en la ciudad de LC el desarrollo urbano se caracteriza por construcciones de uno y dos niveles (casas-habitación de interés social), existe una probabilidad alta de que durante un evento sísmico, el periodo del terreno y de la construcción puede coincidir y presentarse el fenómeno de resonancia, pudiéndose presentar daños severos e incluso el colapso de la vivienda.

I. INTRODUCCIÓN.

En México y en diferentes partes del mundo los sismos, volcanes y fenómenos meteorológicos han causado, desde tiempos antiguos, eventos que han modificado a las culturas, debido al comportamiento de estos fenómenos. En las últimas dos décadas se han implementado trabajos y labores, tanto de las autoridades como de la comunidad científica, para obtener métodos que nos ayuden a evaluar y predecir de forma más aproximada el momento en que se presentará un fenómeno excepcional, así como también, la intensidad y su comportamiento en el tiempo. La costa de Michoacán forma parte de una margen activa donde ahora la Placa de Cocos, en su continua subducción con la placa de Norteamérica, ha generado sismos que han afectado gran parte del país, pero sobre todo a los estados de Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

El marco tectónico, la geografía y las condiciones socioeconómicas de la ciudad de Lázaro Cárdenas, Mich, han favorecido la ocurrencia de emergencias y desastres en varios sectores del municipio, especialmente con los sismos, las inundaciones, inestabilidad de laderas y avenidas torrenciales. Los escenarios dejados por el sismo de septiembre de 1985 exigen que esta población cuente con estudios de microzonificación sísmica. Esto significa que un sismo nos puede afectar y debemos estar preparados. Para ello, debemos conocer en detalle las condiciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmico de ese territorio.

Durante un evento sísmico se originan ondas sísmicas internas y superficiales, que presentan atenuación conforme se alejan del epicentro. Sin embargo, existen casos en donde estas ondas superficiales son amplificadas por efectos geológicos, topográficos y de rigidez del suelo, particularmente en los casos en donde el terreno presenta un comportamiento dinámico distinto al del basamento rocoso, dando origen al efecto de sitio. El daño y hasta el posible colapso de estructuras civiles diversas, se debe a que su periodo natural coincide con el del periodo dominante del terreno. En este trabajo, el estudio de microzonificación sísmica tuvo como objetivo la identificación de dicho periodo dominante del terreno, para que con base en ello, sean evaluados los periodos naturales de las estructuras actuales y futuras localizadas sobre el área de estudio.

Existen diversos métodos para la estimación de los efectos de sitio, entre ellos uno experimental empleado en este trabajo, que determina cocientes espectrales (H/V) propuesto por Nakamura en 1989. Este método utiliza registros de microtemores generados por la vibración ambiental asociada a fuentes naturales y antrópicas. Para la microzonificación sísmica de Lázaro Cárdenas, se eligieron 83 lugares de medición distribuidos uniformemente en la ciudad. El registro de la vibración ambiental se logró mediante un acelerógrafo K2 y sensor EpiSensor triaxial. El procesamiento de la información obtenido en campo, se realizó con la ayuda de programas de cómputo y subrutinas, que permitieron la obtención de los cocientes espectrales de amplitudes de Fourier, a partir de los cuales se determinó el valor del periodo dominante del terreno para cada punto de medición. Con ésta última información se generó finalmente el mapa de isoperiodos de la ciudad de Lázaro Cárdenas, que muestra zonas con diferente comportamiento dinámico.

El análisis de este mapa, revela que el terreno de Lázaro Cárdenas presenta diversos comportamientos dinámicos. Se identifican tres zonas con características sísmicas particulares, que permiten establecer el tipo de construcción más adecuada.

II. MARCO TEÓRICO

II.1 Estructura interna de la Tierra.

Debido a que el hombre no puede estudiar directamente la estructura y la composición de las capas profundas del interior de la Tierra, la fuente principal de información sobre estructura interna y propiedades físicas del subsuelo de nuestro planeta se basan en medidas indirectas que provienen de los estudios geofísicos, especialmente de datos suministrados por la propagación de las ondas sísmicas.

Con base en conocimientos científicos actuales, se establece que el diámetro de la Tierra es de 12,740 km, y está constituida por tres capas concéntricas principales: núcleo, manto y corteza. El núcleo tiene un radio medio de 3,486 km, y está compuesto principalmente de hierro, mezclado con níquel y otros elementos. El manto presenta un espesor aproximado de 2,900 km y se subdivide en manto interno (sólido, elástico), y manto externo (fluido, viscoso). La corteza que corresponde a la capa más externa de la Tierra, es sólida y rígida, es muy delgada en relación con el radio de la Tierra, tiene un espesor que varía de entre los 3 y 15 km bajo las dorsales oceánicas, y más de 70 km debajo de algunos cinturones montañosos como los Andes y el Himalaya. En las cuencas oceánicas la corteza está constituida por rocas de composición basáltica que son más densas y jóvenes que las de la corteza continental (Figura 1). La división entre el manto y la corteza se tiene a través de la discontinuidad de Mohorovicic, que corresponde a una zona de transición entre las rocas más densas no cristalizadas del manto superior y las rocas cristalinas de la corteza, en donde existe un cambio en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas. Se localiza en promedio a una profundidad de 35 km.

II.2 Tectónica de Placas.

De acuerdo con la teoría de la tectónica de placas, la corteza terrestre está dividida en unas 17 placas principales que se desplazan unas respecto de otras, impulsadas por corrientes de convección que se generan en el manto. La mayor parte de la actividad sísmica en el mundo está asociada, directa o indirectamente, con el movimiento relativo de las placas de la litosfera y con su interacción a lo largo de las zonas de contacto (Figura 2). Las placas tienen movimientos relativos entre sí, los cuales se pueden clasificar como transcurrente, convergente y divergente. La zona de movimiento divergente se presenta cuando una placa se aleja de la otra. En este caso se genera una abertura entre las placas, de la cual emerge material magmático que al tener contacto con la atmósfera se solidifica formando corteza joven. A las zonas de separación se les conoce como cordilleras y por lo regular se presentan dentro de los océanos. (Figura 2 A). El movimiento convergente o de subducción, se presenta cuando en la zona de contacto una placa se introduce por debajo de la otra, como ejemplo, la placa de Cocos penetrando debajo de la placa de Norteamérica en la costa del Pacífico Mexicano (Figura 2 B). La zona de movimiento transcurrente, o también conocida como de transformación, se presenta cuando las placas se mueven entre sí lateralmente. En este caso no se crea ni se destruye material cortical (Figura 2 C). Un ejemplo de este movimiento es el que se tiene en la falla de San Andrés, la cual atraviesa en estado de California dentro de los Estados Unidos de Norteamérica

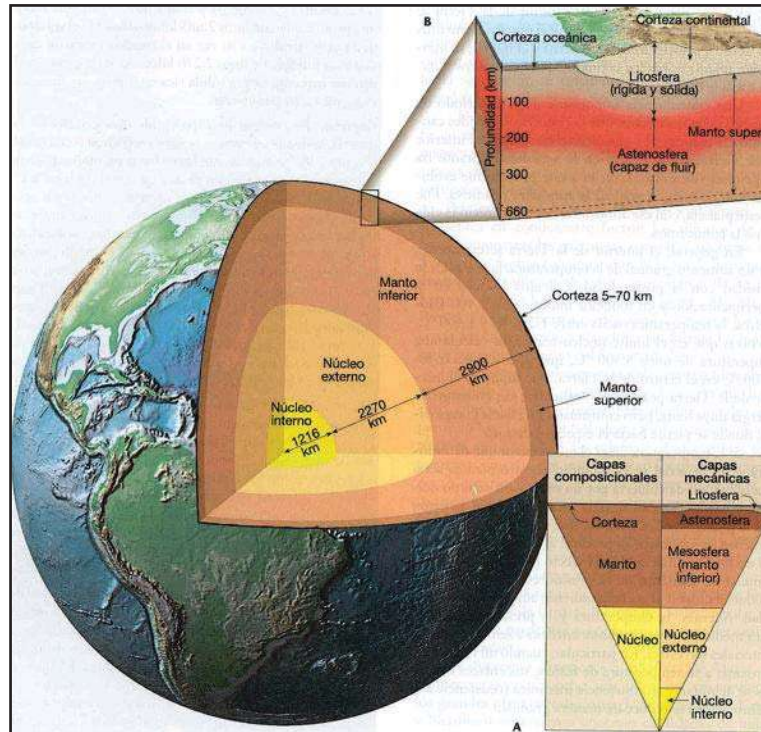


Figura 1.- Visión de la estructura en capas de la Tierra. Núcleo interno y externo, manto inferior y superior, corteza oceánica y continental, litósfera rígida y astenosfera blanda. Fuente: Ciencias de la Tierra, una introducción a la Geología Física.

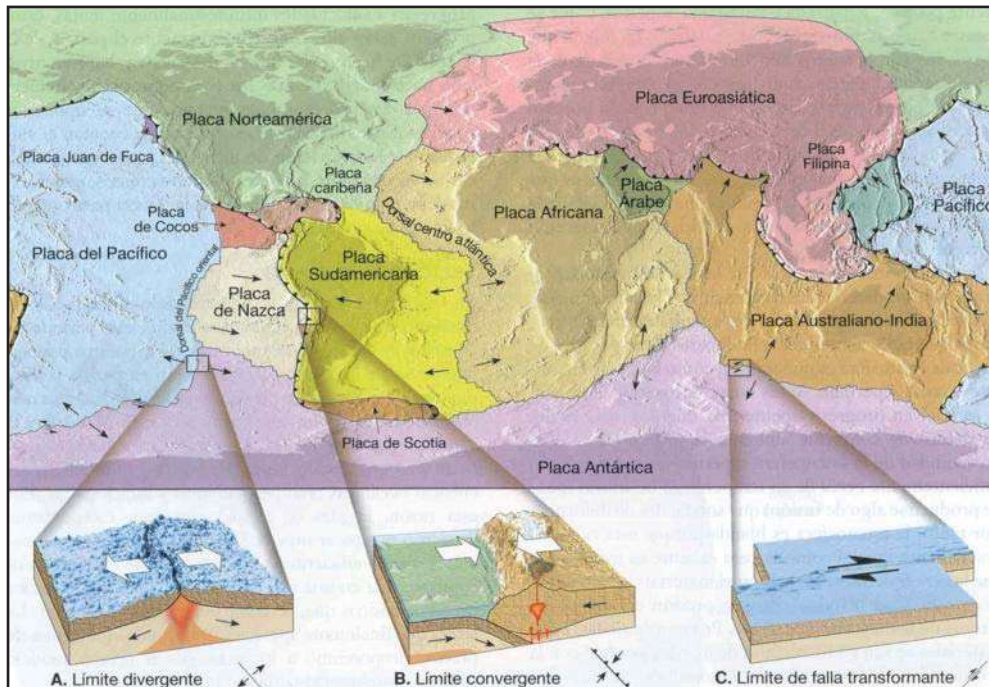


Figura 2.- Mosaico de las placas rígidas que constituyen la envuelta externa de la tierra. Fuente: libro Ciencias de la Tierra (tomado de W. B. Hamilton, U.S. Geological).

II.3 Principales fuentes sísmicas.

Los sismos pueden ser de diferentes magnitudes y algunos no provocar daños, pero en general representan un riesgo inminente para la humanidad independientemente de sus fuentes generadoras. El riesgo es mayor cuando la fuente donde se produce un sismo se encuentra cerca de asentamientos humanos con gran densidad de población. Las principales fuentes de sismos se pueden clasificar en:

- a). *Fuentes de colapso*: asociadas al derrumbamiento de cavernas y minas. Generalmente, estos sismos ocurren cerca de la superficie y se llegan a sentir en un área reducida, por lo que dichas áreas pueden ser poco peligrosas, a excepción del área de colapso donde el peligro es evidente. (CENAPRED, 1995 in Sánchez Garcilazo, 2000).
- b). *Fuentes explosivas*: pueden ser desde muy pequeñas como las asociadas a explosiones químicas utilizadas en la construcción, hasta bastante grandes como explosiones nucleares que pueden ser comparables con la energía que producen los sismos de magnitud intermedia (Nava, 1998).
- c). *Fuentes de impacto*: es posible suponer que el impacto de un meteorito pueda generar ondas sísmicas apreciables ya que su efecto es parecido al de una fuente explosiva en la superficie terrestre, el meteorito de Siberia (30 de junio 1908) es un ejemplo de ello (Nava, 1998).
- d). *Fuentes volcánicas*: en este tipo de fuentes existen cuatro tipos de actividad sísmica asociadas:

Sismo volcánicos tipo A: generalmente pequeños ($M < 6$) que ocurren a profundidades de 1 a 20 km bajo volcanes, y usualmente en forma de enjambres. Presentan altas frecuencias y el comienzo de los registros de estos eventos en los sismógrafos es súbito y abrupto.

Sismos volcánicos tipo B: ocurren por lo general en cráteres activos o cerca de ellos; son muy someros y de magnitudes muy pequeñas, presentan arribos graduales a emergentes; son aparentemente ondas superficiales. Es común que este tipo de sismos aumente antes de las erupciones, por lo que son útiles para la predicción de éstas. Son causados por procesos de desgasificación (pequeñas explosiones) del magma.

Tremor volcánico: éstos se presentan antes de una erupción. Se observa en los sismógrafos que operan sobre el volcán una vibración regularmente continua. Dicha vibración probablemente es causada por movimientos de la columna magmática o por movimientos de enjambres de sismos de tipo B, también pueden ser por ambos movimientos.

Sismos volcánicos explosivos: éstos son generados por las erupciones explosivas; su magnitud, que es proporcional a la energía cinética de la erupción, es generalmente pequeña y son sentidos solamente en las inmediaciones del volcán (Nava, 1998).

- e). *Fuentes tectónicas*: son aquellas que producen sismos por la interacción de placas tectónicas, se han definido dos clases de ellas:

Sismos interplaca, ocasionados por una fricción en las zonas de contacto entre las placas debido a la subducción una debajo de la otra.

Sismos intraplaca, ocasionados por la deformación continental y fallas de tipo normal, son sismos con epicentro dentro de la placa continental (lejos de los límites de placas conocidas). Debido a la subducción, el echado de la placa (es pequeño) y por las grandes profundidades a las que se encuentra, comienza a fundirse (por las altas temperaturas existentes), y a demás por su propio peso producen fallamientos tipo Normal. Los sismos intraplaca son mucho menos frecuentes que los interplaca y generalmente también de menor magnitud. Un tipo particular de sismos intraplaca son los llamados locales, que son producto de deformaciones de los materiales terrestres debido a la concentración de fuerzas en una región limitada. (CENAPRED, 1997)

- f). *Fuentes por fallas locales*: son todas aquellas fallas que se encuentran localizadas en el interior de la placa continental y pueden ser activas o no activas, en el caso de las fallas activas representan una zona de alta peligrosidad, debido a que los sismos producidos por ellas son de focos superficiales que provocan que la energía liberada repercuta casi directamente a la superficie, construcciones y zonas aledañas.

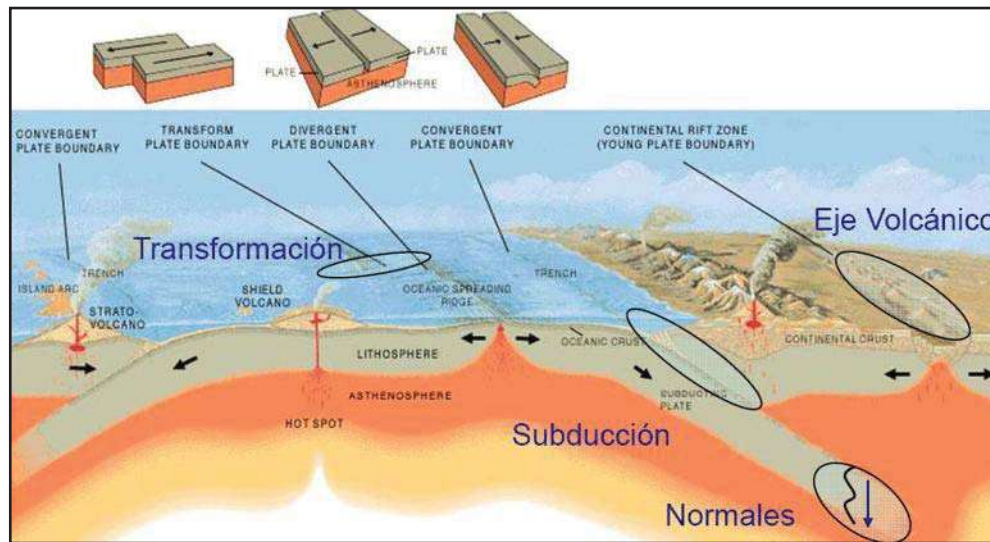


Figura 3- Algunas fuentes sísmicas. (Fuente original: U.S. Geological Survey)

III. ANTECEDENTES

III. 1 Fuentes sísmicas potenciales en Michoacán.

Michoacán forma parte de la placa de Norteamérica, y se encuentra en un margen de tipo activo que está expuesto principalmente a fuentes sísmicas volcánicas, tectónicas, intraplaca y de fallas locales. En este estado la interacción entre la placa oceánica de Cocos y la continental de Norteamérica, produce sismos de subducción cuyos epicentros se localizan en la zona costera (ejemplo sismo del 19 de septiembre de 1985), y sismos intraplaca que son producidos en la frontera entre ambas pero a mayor profundidad, cuyo epicentro se localiza dentro de la placa continental (ejemplos sismos del 7 de Abril de 1847, y el del 19 de Junio de 1858) (Vázquez-Rosas, 2002).

Debido a la interacción entre las dos placas tectónicas mencionadas, se ha desarrollado una importante actividad tecto-volcánica que ha generado varios aparatos volcánicos hacia el centro del estado, formando importantes cuencas lacustres. Dicha actividad volcánica es responsable de la producción de una gran cantidad de sismos (volcánicos), como los producidos por el surgimiento y las erupciones de los volcanes del Jorullo en 1759, y del Parícutin en Febrero de 1943; las cuales han sido precedidas por ruidos subterráneos (tremores). Existen también grandes fallas locales, las cuales se localizan en la placa continental, algunas pueden ser sísmicamente activas, como el caso del sistema de fallas Morelia-Acambay (Garduño, *et al*, 1998), que es un sistema de fallas con dirección E-W en las que se han generado sismos de focos poco profundos (Acambay, 1912; Región de Morelia, 1925 y 2007; Maravatío, 1979), que llegan a ser muy destructivos cuando ocurren cerca de las construcciones y localidades urbanas debido a que las ondas sísmicas generadas se producen y llegan casi directamente.

Así, Michoacán se encuentra en una zona de gran actividad sísmica, por un lado la dinámica de la subducción de la placa de Cocos por debajo de la Norteamericana, y por el otro, de manera más local, la generación de nuevos aparatos volcánicos y la presencia de fallas locales potencialmente activas. Por lo anterior, se deduce que existe un alto riesgo sísmico y que es necesaria la realización de trabajos de investigación relacionados con sismos, como es el caso de la microzonificación sísmica, para un mejor conocimiento respecto al tema y su posible influencia en la población.

III. 2 Sismicidad histórica.

Primeramente se muestra el promedio anual de temblores ocurridos en el mundo (Tabla 1), así como una gráfica de la sismicidad en México (Figura 4), que indica la tasa de excedencia de magnitud en años (Jara-Guerrero, 2008). En éste último gráfico, se determina que pueden ocurrir 0.3548 temblores al año de magnitud de 7.0 grados en la escala de Richter, es decir, un temblor de magnitud igual a 7.0 grados puede ocurrir cada 2.82 años en México, lo que indica un alto grado de sismicidad.

La primera etapa de la sismología en México se basa en las descripciones y reportes de los efectos y daños que causaron los sismos en el pasado, antes de la instalación y operación de los primeros sismógrafos en el país.

Las primeras descripciones históricas de sismos en México datan de la época prehispánica. Los códices Vaticano Ríos, Aubin y Telleriano, hacen referencias a grandes sismos y erupciones volcánicas de la época. Durante la conquista de México, los españoles, procedentes de regiones asísmicas, se concretaron a hacer anotaciones de los efectos observados, sugiriendo interpretaciones de estos fenómenos según los pensamientos de esos tiempos. Durante el siglo XVI los sismos eran atribuidos a la furia divina, en donde los Dioses en venganza de alguna desobediencia hacían que la tierra se moviera, causando gran pánico y desolación entre nuestros antepasados (Nava, 1998). Sin embargo, no fue sino hasta mediados del siglo XVII, en el cual se presentan los primeros informes formales de los daños producidos por sismos, principalmente emanados de las autoridades eclesiásticas, las cuales a su vez los atribuían a las fuerzas divinas, y cada vez que sucedía un sismo elevaban oraciones, para pedir clemencia a Dios por sus pecados (Vázquez-Rosas, 2002).

Tabla 1.- Promedio anual de temblores en el mundo.

MAGNITUD (escala de Richter)	8	7	6	5	4	< 4	< 3
NÚMERO PROMEDIO	2	20	100	3,000	15,000	150,000	Pasan desapercibidos o son percibidos muy localmente.



Figura 4- Sismicidad en México, peligro sísmico probabilista (Jara-Guerrero J. M. et. al, 2008)

Hasta finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, fue cuando iniciaron las explicaciones lógicas a los fenómenos sísmicos, un ejemplo muy claro de ello es la erupción del volcán El Jorullo en el estado de Michoacán, en las inmediaciones de la Huacana, en el cual se presentaron explicaciones científicas, desarrolladas en esos mismos tiempos. La sismología reciente en México también está basada en el registro de la información sísmica de manera instrumental,

cuando el 5 de septiembre de 1910, por Decreto Presidencial se fundó e inauguró el Servicio Sismológico Nacional.

Trabajos similares que contienen información lo más completa y apegada a la realidad histórica de los sismos en el estado, son los realizados por: Martínez y Javier (1991); García-Acosta y Suárez-Reinoso (1992?) y los realizados por Garduño-Monroy (1996) y Escamilla (1996), en los cuales se presentan varias descripciones de tal y como las personas sintieron los distintos movimientos telúricos en cada población del estado (Vázquez Rosas, 2002).

Algunos temblores de gran magnitud en México, registrados durante los siglos XIX y XX se muestran en la tabla 2

Tabla 2.- Del catálogo de temblores de gran magnitud en México de los siglos XIX y XX (Singh, *et al*, 1984).

FECHA	REGIÓN	MAGNITUD (Escala de Richter)
25 Marzo 1806	Costa de Colima-Michoacán	7.5 grados
31 Mayo 1818	Costa de Colima-Michoacán	7.7 grados
19 Junio 1858	Norte de Michoacán	7.5 grados
15 Abril 1941	Michoacán	7.7 grados
30 Enero 1973	Michoacán	7.5 grados
19 Septiembre 1985	Frente a Costa de Michoacán	8.1 grados

Temblores ocurridos cerca de la ciudad de Lázaro Cárdenas Michoacán (2006-2008) (Tabla 3)

Tabla 3- Temblores cerca de Lázaro Cárdenas 2006-2008, (Servicio Sismológico Nacional, 2009)

Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Prof. (km)	Mag.	Zona
2006-01-13	23:54:05	17.95	-101.9	21	4.1	33 km. al Este de Lázaro Cárdenas
2006-01-22	03:05:22	17.1	-102.45	15	3.7	98 km. al Suroeste de Lázaro Cárdenas
2006-02-17	05:44:04	17.93	-102.04	25	4.0	19 km. al Este de Lázaro Cárdenas
2006-05-29	19:23:02	17.99	-101.89	48	3.7	34 km. al Este de Lázaro Cárdenas
2007-01-25	01:06:49	16.95	-102.5	16	4.3	116 km. al Suroeste de Lázaro Cárdenas
2007-04-09	06:15:02	17.99	-101.86	15	3.9	38 km. al Este de Lázaro Cárdenas
2007-04-17	03:38:29	17.73	-102.19	16	3.9	25 km. al Sur de Lázaro Cárdenas
2007-07-08	13:03:56	17.53	-102.02	9	4.0	51 km. al Sureste de Lázaro Cárdenas
2008-01-14	19:05:36	17.87	-101.88	4	3.8	36 km. al Este de Lázaro Cárdenas
2008-02-07	19:01:13	17.53	-102.05	16	3.8	50 km. al Sureste de Lázaro Cárdenas
2008-05-20	15:20:45	17.93	-101.88	28	4.1	35 km. al Este de Lázaro Cárdenas

III. 3 Sismicidad de los últimos años en la región.

Michoacán es uno de los estados de la República Mexicana con mayor actividad sísmica, solamente de enero de 1990 a julio de 2006 se han registrado 2835 eventos sísmicos de diferentes magnitudes, en la zona que se muestra en la figura 5 (17° a 22° de latitud norte, 100° a 106° de longitud oeste). La mayoría de los eventos tienen sus epicentros en la región de la costa (sismos de subducción), pero algunos eventos presentaron sus epicentros en la zona del interior del estado tanto en la región de Morelia como al oriente del Estado, entre los límites con Guanajuato y el estado de México (sismos intraplaca).

Dentro de Michoacán se puede notar que algunos de los epicentros presentan un arreglo lineal, que puede ser asociado a fallas geológicas activas. Por otra parte, en la zona costera, entre los estados de Colima y Michoacán se observa una franja donde no se tiene registro de epicentros, por lo que puede evidenciar la presencia de una brecha sísmica.

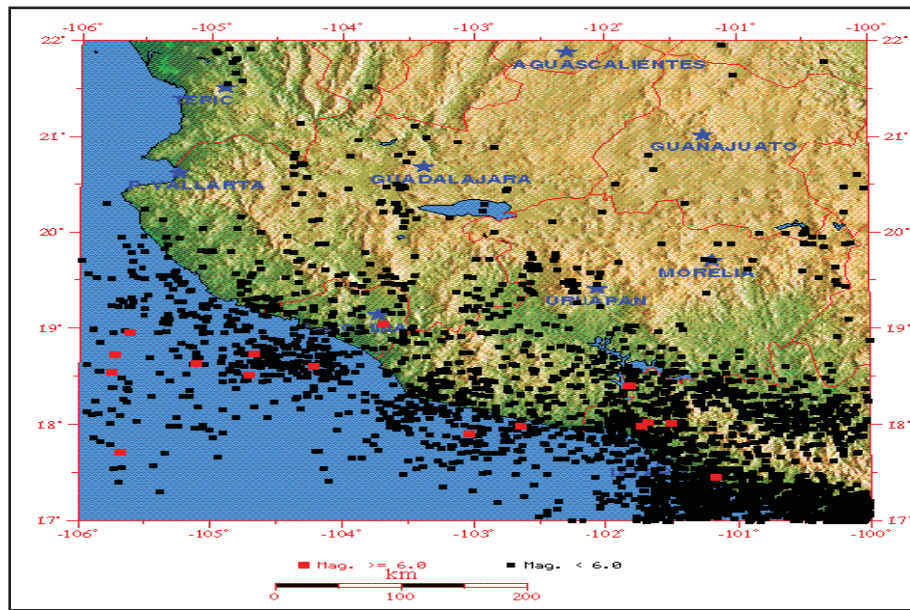


Figura 5.- Sismicidad (Enero, 1990-Julio, 2005), se localizan 2835 eventos. Los puntos rojos representan epicentros de eventos con magnitud mayor o igual a seis, y los de color negro los epicentros con magnitud menor a seis. (SSN)

De los 2835 eventos registrados instrumentalmente, no se ha presentado ninguno de ellos con magnitud igual o mayor a ocho grados, mientras que solamente se han registrado 16 sismos con magnitud igual o mayor a seis grados, observando que la mayoría de los eventos son de magnitud tres y cuatro (en la escala de Richter), que representan el 95.98 % del total (Tabla 4).

Tabla 4.- Magnitudes de los 2835 sismos registrados entre las costas de Michoacán, Guerrero y Colima entre Enero de 1990 y Julio del 2005 (fuente SSN)

Magnitud	< 3	3	4	5	6	7	≥ 8
No. de Sismos	25	1354	1367	73	12	4	0

III. 4 Zonificación Sísmica

La Comisión Federal de Electricidad divide a la República Mexicana en cuatro zonas sísmicas con fines de diseño antisísmico. Para la realización de dicha división (Figura 6) se utilizaron los catálogos de sismos de la República Mexicana desde inicios de siglo pasado, grandes sismos que aparecen en los registros históricos, y los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos en el siglo XX.

La zona A corresponde a un sector del territorio mexicano en donde se no se han registrado sismos en los últimos 90 años, y no se esperan aceleraciones del terreno causadas por temblores mayores al 10% de la aceleración de la gravedad. En la zona D se han reportado frecuentemente grandes sismos históricos, con aceleraciones del terreno que pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Las otras dos zonas (B y C) son intermedias, donde se registran sismos con poca frecuencia o son afectadas por altas aceleraciones en el terreno pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad.



Figura 6.- Mapa de regionalización sísmica de la República Mexicana, tomado del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (1993).

Las primeras zonificaciones sísmicas de Michoacán, corresponden a las propuestas por el Reglamento de Construcciones de dicho estado. La primera de ella se propuso en 1986 (Figura 7) y corresponde a un recorte de la zonificación sísmica de la República Mexicana, descrita anteriormente. La segunda zonificación fue propuesta en 1999 (Figura 8) y es aún vigente en el actual Reglamento de Construcciones. En ésta se observan ampliaciones en las zonas D y C que corresponden a las de mayor riesgo sísmico. La zona B se limita únicamente al bajío michoacano, sector norte del estado.

Con base en una revisión histórica exhaustiva de la sismicidad de Michoacán, Sánchez-Garcilazo propone en el 2000 una re zonificación sísmica para el estado, en la que se proponen tres zonas (Figura 9):

- La Zona I, incluye el territorio michoacano con registros sísmicos producto de la subducción a una profundidad promedio de 33 km, y a una distancia de hasta 130 km a partir de la trinchera.

- La Zona II, se caracteriza por el predominio de sismos intraplaca producto de la subducción, con profundidades de entre 33 y 170 km, y a una distancia de la trinchera de 130 a 250 km.
- La Zona III, presenta sismos asociados a la actividad volcánica del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), esta tercera zona está dividida en dos sub-zonas similares (consideradas de igual riesgo sísmico): la zona IIIa que corresponde al terreno con sismos de tipo volcánico producto de la actividad del CVM, y sismos por fallas geológicas activas; la zona IIIb corresponde a la región del CVM que se distingue por poseer sismos asociados a fallas geológicas en regiones lacustres (Sánchez-Garcilazo, 2000).

Esta propuesta de zonificación sísmica no se basa en los contornos de las divisiones políticas municipales como sucede en los mapas de zonificación oficiales.



Figura 7.- Mapa de zonificación sísmica de Michoacán adaptada del Reglamento de Construcciones del Estado, 1986.

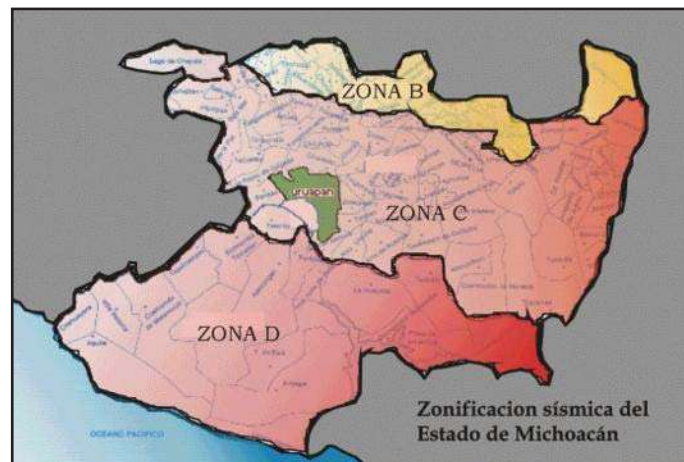


Figura 8.- Mapa de zonificación sísmica de Michoacán adaptada del Reglamento de Construcciones del Estado, 1999.



Figura 9.- Mapa donde se presenta la propuesta de re zonificación sísmica del Estado (Sánchez-Garcilazo, 2000).

Con base en lo anterior, la ciudad de Lázaro Cárdenas presenta un elevado riesgo sísmico debido a que se encuentra en una zona de alta sismicidad, y a expuesta a posibles daños provocados por efectos de sitio ante un evento sísmico.

Este tipo de situaciones conduce a la necesidad de que las grandes ciudades del estado de Michoacán que se encuentran cercanas o dentro de las zonas de alto potencial sísmico, cuenten con información relativa al comportamiento dinámico del terreno sobre el que se encuentran, estableciendo áreas con diferentes grados de peligro por sismos de magnitud considerable, lo cual se conoce como microzonificación sísmica (Vázquez-Rosas, 2002).

III.5. Mapa de isosistas de eventos sísmicos del año 1850 a 1985 en México.

Considerando los trabajos sobre el Atlas de Peligros sísmicos del estado de Michoacán, realizado por Garduño-Monroy *et al*, (2005), resulta por demás interesante esta recopilación de isosistas realizada durante 135 años en México, se destacan a nivel nacional seis zonas (Figura 10):

- a. La zona de Mexicali (Falla San Andrés) donde se observan magnitudes en la escala de Mercalli modificada de X.
- b. La zona de la frontera entre Chihuahua y Sonora, donde se obtienen intensidades de hasta XII MM.
- c. La zona de subducción Pacífica con intensidades de X
- d. La zona del Cinturón Volcánico Mexicano con intensidades de X
- e. La zona de Tehuacan con intensidades de X
- f. La zona de Chiapas con el mismo tipo de intensidades.

Si analizamos el estado de Michoacán, por si solo nos damos cuenta que el área que ocupa la isosista de X se concentra a la costa del Pacífico, mientras que aquellas con intensidades de IX son frecuentes tanto en la costa como en el Cinturón Volcánico Mexicano, es decir en la zona ocupada por las fallas E-W y las cuencas lacustres. Es interesante constatar que el estado de Michoacán se conforma de isosistas que van desde V hasta IX MM, lo cual hace que la respuestas del terreno presentara siempre un factor de incertidumbre en las obras civiles.

Esta recopilación de isosistas es muy interesante debido a que en ella se aprecia que en los lugares más habitados del estado, es donde las isosistas son de considerable intensidad. Si aunado a ellos consideramos el aumento de la población y de infraestructura, podemos entender cómo ha crecido el factor de riesgo en el estado. El sismo de 1858 causó daños importantes en la población de Morelia, que tan solo contaba con 20,000 habitantes ocupando la parte más rígida de los suelos. Comparando ese escenario pasado con uno actual, donde la población ha ocupado zonas de alto riesgo; los daños entonces serian mayores debido a la alta concentración urbana de casi 1 millón de habitantes.

Para la ciudad de Lázaro Cárdenas, las intensidades estimadas serian de 9, es decir que cualquier sismo que afecte a la costa de Michoacán tendrá siempre grandes valores en lo referente a riesgos sísmicos.

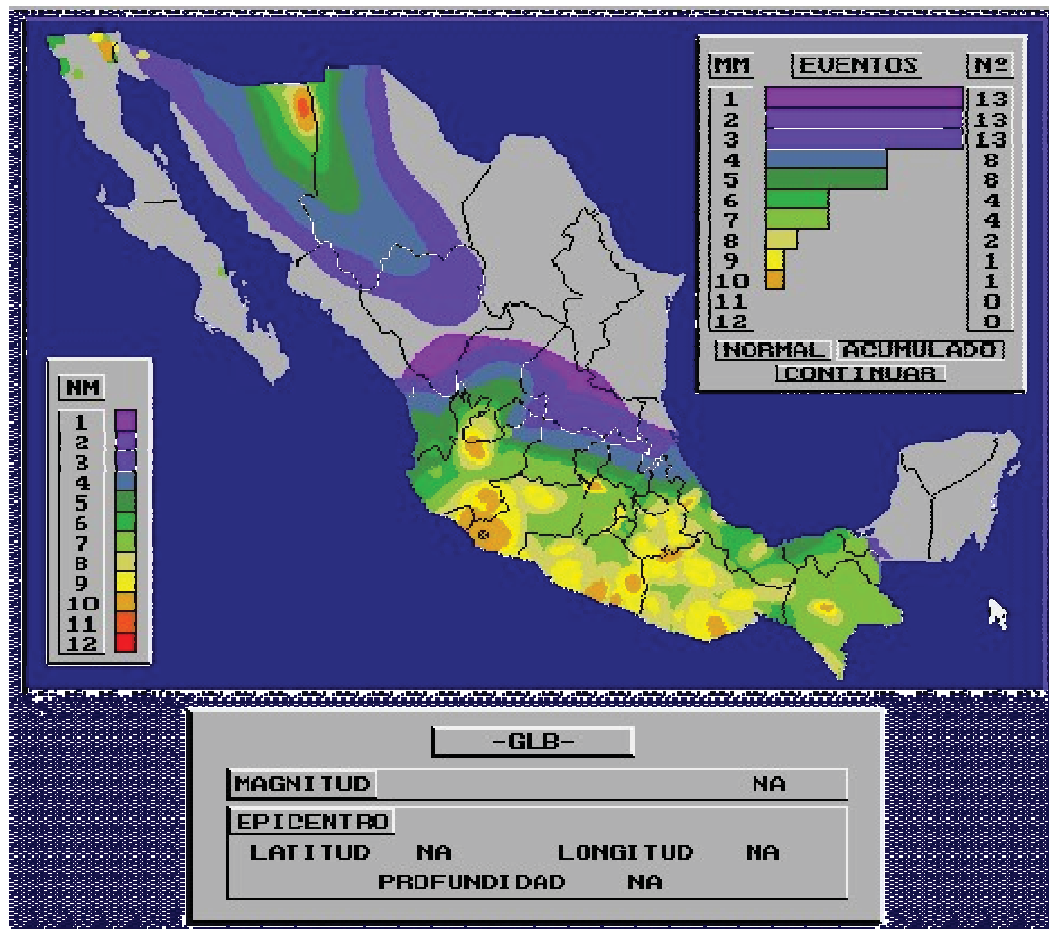


Figura 10. *Mapa de isosistas de eventos sísmicos del años 1850 A 1985.* Obtenida por medio del programa realizado en el CENAPRED (Gutiérrez Martínez C y Montuyo Duche C).con la escala de magnitud de Mercalli modificada MM y No. numero de eventos acumulados

III. 6 Microzonificación sísmica.

La microzonificación sísmica consiste en la división de un territorio urbano en micro zonas o regiones geográficas, que van a manifestar comportamientos diferentes ante la ocurrencia de un sismo. Dicha microzonificación se presenta en mapas donde se muestra la distribución espacial de los periodos dominantes del terreno, que ayuda a los ingenieros y a las autoridades locales en las tareas de planeación urbana, prevención y mitigación del riesgo sísmico; mediante la reducción de la vulnerabilidad de los elementos sometidos a riesgo: personas, viviendas, instalaciones críticas y el medio natural.

A continuación se realiza una descripción del efecto de sitio y de microtemores, que son importantes para un mejor entendimiento de la microzonificación.

III.7 Efecto de sitio

El movimiento en la superficie del terreno de un sitio dado, puede diferir radicalmente del que se tiene en la roca base, por alteraciones de las características de las ondas sísmicas debidas a efectos geológicos, topográficos y de rigidez del suelo. Dichas alteraciones son llamadas efectos de sitio. Así, se conoce como efecto de sitio a las diferencias de comportamiento del terreno en términos de amplitud, duración o contenido de frecuencias de oscilación ante la presencia de un sismo en un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional. Se puede decir que el efecto de sitio da lugar a la observación de intensidades sísmicas notablemente distintas y bien localizadas, sin que haya una correlación con la atenuación normal de la energía sísmica ni con la distancia. Un claro ejemplo de lo anterior se tiene en la zona de lago de la ciudad de México (CENAPRED)

En general, el efecto de sitio se puede explicar como la respuesta que tiene cada lugar ante un mismo evento sísmico, lo que depende de sus condiciones geológicas, topográficas y en gran medida, de las primeras decenas de metros de la superficie terrestre (Reinoso, 2000). Ya que las señales sísmicas al propagarse por un medio blando, sufren amplificaciones al entrar en resonancia con algún modo de vibración propio del material del que está compuesto el estrato del terreno.

Reinoso (2000) afirma que el estudio del efecto de sitio es indispensable para la elaboración de reglamentos de diseño sísmico de estructuras, por lo que clasifica los principales efectos de sitio como sigue:

- a). Por la topografía del terreno, la superficie del mismo puede provocar amplificación o deamplificación del movimiento.
- b). Por la presencia de depósitos con arena, se puede presentar el fenómeno en el cual el terreno pierde su capacidad de carga debido al aumento en la presión de poro y, en algunos casos, la licuación de estratos completos de arenas.
- c). Por la presencia de depósitos con arcillas en valles aluviales o lacustres, se presenta amplificación dinámica debido al contraste de velocidad del suelo superficial con respecto a los depósitos profundos.
- d). Deslizamientos y derrumbes, que son los responsables de gran parte de los daños en vías de comunicación.

e). Cambios en la estructura superficial.

Una manera muy simplificada de explicar el efecto de sitio es idealizando las condiciones geológicas de un sitio, mediante un modelo unidimensional que consiste en una capa plana sobre un espacio semi-infinito. El efecto del mismo está definido por dos parámetros: una frecuencia fundamental de resonancia y sus múltiplos; y un valor de amplificación con respecto al movimiento sísmico en roca (Lermo, 1992; en Vázquez-Rosas, 2002).

III.8 Métodos para la estimación del efecto de sitio.

La importancia del efecto de sitio y los daños que puede ocasionar, se hicieron conocidos y evidentes a nivel mundial, después de la catástrofe ocurrida en la ciudad de México por el sismo de 1985 (magnitud de 8.1 en la escala de Richter). Los métodos para la estimación de efectos de sitio se pueden agrupar como se observa en la figura 11.

Los métodos teóricos se basan en modelos matemáticos aplicados al lugar, resueltos analíticamente o mediante procesos numéricos. Mientras que los métodos experimentales se basan en el registro de eventos sísmicos, ya sea empleando datos de terremotos con funciones de transferencia empíricas, o con cocientes espectrales; y los datos de ruido ambiental (microtremores), lo que proporciona información referente al periodo dominante.

El hecho de tener que esperar la ocurrencia de un evento sísmico para la estimación del efecto de sitio es una gran desventaja, en cuanto a tiempo y seguridad se refiere. Es por ello que en los últimos años el uso de microtremores en la estimación de efecto de sitio, se ha incrementado considerablemente.

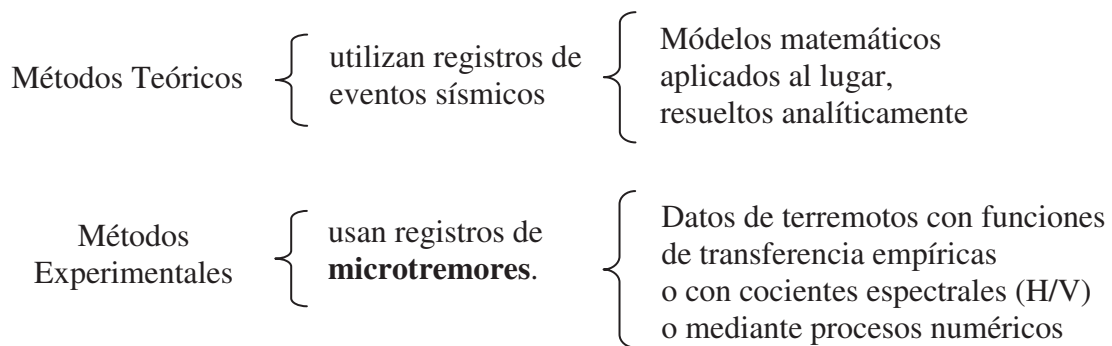


Figura 11.- Esquema que ilustra los dos grupos principales de los métodos para la evaluación del efecto de sitio.

III.9 Microtremores.

Los microtremores se conocen como microsismos, ruido sísmico de fondo, oscilaciones omnipresentes o micro trepidaciones, y son la vibración ambiental o ruido ambiental, provocada por fuentes naturales y la actividad humana. Como fuentes naturales podemos citar perturbaciones oceánicas y alteraciones en las condiciones atmosféricas (viento, lluvia, etc.); y como producto de la actividad humana podemos mencionar el tránsito de vehículos y otras vibraciones terrestres (Aguirre-González, *et al.*, 2003).

A pesar de que existen numerosos estudios sobre vibración ambiental, todos ellos realizados en Japón, es a Kanai a quien se le considera el padre del uso de los microtemblores con el objetivo de estudiar los efectos locales (Aguirre-González, *et al*, 2003).

Sin embargo, la idea original de Kanai y sus colegas era errónea en cuanto al origen e interpretación de los microtemblores, ya que ellos consideraban que la fuente de microtemblores era ruido blanco y que contenía básicamente ondas de cuerpo. Actualmente, se ha demostrado que los microtemblores consisten, en mayor proporción, de ondas superficiales. En cuanto las fuentes que producen los microtemblores, se sabe que a frecuencias bajas (por debajo de 0.3 a 0.5 Hz) son causados por ondas oceánicas que ocurren a grandes distancias, y que es posible encontrar buena correlación de los microtemblores en estos periodos, con condiciones meteorológicas de gran escala en el océano. A frecuencias intermedias (entre 0.3 y 1 Hz) los microtemblores son generados por olas del mar, que se registran en terrenos cercanos a las costas, por lo que su estabilidad es significativamente menor que la de las bajas frecuencias. Para frecuencias más altas (mayores de 1 Hz), las fuentes de los microtemblores están relacionadas con la actividad humana y reflejan los ciclos humanos. Por lo que, en su conjunto, el espectro de ruido tendrá picos relacionados a diferentes frecuencias, es decir no es plano (Aguirre-González, *et al*, 2003).

En principio, tanto la observación como la investigación de microtemblores se desarrolló únicamente en Japón, no fue sino hasta los años 80's cuando el uso de los microtemblores se extendió por otros países del mundo como Estados Unidos, México, Chile y China. En la *12th World Conference on Earthquake Engineering*, realizada en Nueva Zelanda en febrero del 2000, Stephenson (2000; en Vázquez-Rosas, 2002) encontró una gran cantidad de resúmenes relacionados con microtemblores. Esto muestra el gran impacto y auge que ha tenido el método de Nakamura a nivel mundial.

Tradicionalmente se distingue entre el ruido de origen natural (frecuencias menores de 1 Hz.) al que llaman “microtemblores” (*microseisms*), del ruido causado por el hombre (frecuencias mayores de 1 Hz.) al que se le conoce como “microtemblores” (*microtremors*), (Aguirre-González, *et al*, 2003). Pero en general y de manera particular, para el presente trabajo se considerará a los microtemblores como la vibración ambiental provocada tanto por fuentes naturales como por la actividad humana (Figura 12). Chávez-García, *et al* (1998; en Vázquez-Rosas, 2002) especifican que los microtemblores son una herramienta confiable para completar información acerca de la respuesta de sitio, cuando los datos de terremotos o eventos sísmicos son escasos o difíciles de adquirir.

Bard (1998) señala que algunas de las ventajas que ofrece el uso de registro de microtemblores son:

- Que pueden ser medidos casi en cualquier momento y en cualquier lugar.
- Los instrumentos para su medición y análisis son simples.
- Su medición no genera problemas ambientales.

El hecho de tener que esperar la ocurrencia de un evento sísmico para la estimación de efectos de sitio es una gran desventaja, en cuanto a tiempo y seguridad se refiere. Es por ello que en los últimos años el uso de microtemblores en la estimación del efecto de sitio se ha incrementado considerablemente (Vázquez-Rosas, 2002; Flores-Estrella *et al.*, 2003).

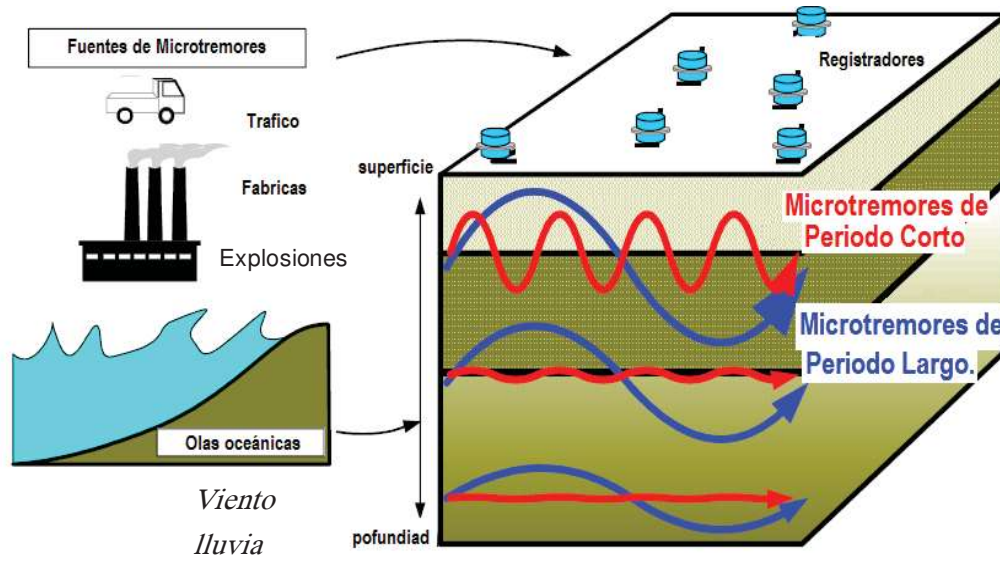


Figura 12.- Algunas fuentes generadoras de microtremores. En la superficie se representa el equipo registrador de las señales de microtremores.

III. 10 Método de Nakamura

Nakamura en 1989 propuso un método para estimar lo que él llamó “las características dinámicas del suelo” a partir de registros de microtremores, por su economía y la fácil adquisición de estos. Este método se basa en asumir que la relación entre el espectro horizontal y vertical del tremor en la superficie es aproximadamente una función de transferencia. Nakamura acepta la existencia de ondas superficiales en los registros de microtremores, en particular, en la componente vertical que refleja el efecto de las fuentes artificiales locales (tráfico); pero, la finalidad de su método es eliminar el efecto de las ondas Rayleigh, ya que considera que son solamente ruido, y así obtener un “resultado directamente relacionado con la función de transferencia para las ondas S”. Él asume que la componente horizontal del tremor está amplificada por multireflectores de ondas S, que la componente vertical está afectada por ondas Rayleigh, y que los microtremores se deben a fuentes muy locales, eliminando así cualquier contribución de fuentes profundas (Vázquez-Rosas, 2002).

De acuerdo con la metodología utilizada por Nakamura (1989), la función de transferencia de las capas superficiales se puede definir como el cociente:

$$ST = SHS/SHB$$

Donde:

SHS = Componente horizontal del tremor en la superficie.

SHB = Componente horizontal del tremor en el substrato.

Se supone que la componente vertical del tremor refleja el efecto de las fuentes locales, que no es amplificado por las capas superficiales, y que el efecto de las ondas Rayleigh (ES) puede ser estimado por el cociente:

$$ES = SVS/SVB$$

Donde:

SVS = Componente vertical del tremor en la superficie.

SVB = Componente vertical del tremor en el sustrato.

Si $ES = 1$, no existe contribución de ondas Rayleigh; y si $ES > 1$, el efecto de las ondas Rayleigh también es mayor. Y se asume que el efecto de las ondas de Rayleigh es igual para las componentes horizontal y vertical. Por lo que una función de transferencia del sitio sin efecto de las ondas de Rayleigh, estaría dada por el cociente de ST/ES , que reagrupado puede reescribirse como:

$$STT = (SHS/SVS) / (SHB/SVB) = RS/RB$$

Nakamura calcula el cociente RB en dos estaciones que cuentan con datos de pozos, y afirma que es $\cong 1$, por lo que define la función de transferencia del sitio como $STT \cong RS$, siendo entonces:

$$STT \cong SHS/SVS$$

En otras palabras, el tremor vertical de la superficie conserva las características del tremor horizontal del sustrato, de tal modo que lo sustituye. Esto significa que la función de transferencia para las ondas S puede ser estimada tomando en cuenta solamente los registros en superficie (Nakamura, 1989). Este autor también afirma que la máxima amplificación del terreno puede calcularse a partir del valor máximo del cociente espectral entre los componentes horizontal y vertical en la superficie (Vázquez-Rosas, 2002).

Sin embargo hay detalles que Nakamura no menciona en su trabajo, como por ejemplo: el componente horizontal que se debe de considerar para el cálculo de los cocientes espectrales, y cómo disminuir el efecto multidireccional de las fuentes de microtemores que impide conocer la dirección de máximo movimiento.

La ventaja del método de Nakamura es que la frecuencia fundamental se puede obtener con cierta confiabilidad; esta frecuencia es de suma importancia porque, conociéndola se puede evitar la construcción de edificaciones con frecuencias similares (Reinoso, 2000). El método de Nakamura puede ser de gran utilidad si el registro y el análisis se realizan cuidadosamente. Vázquez-Rosas (2002) en su trabajo, escribe algunas “ideas para principiantes” y sugiere lo siguiente para la adquisición de los datos:

- Utilizar sensores de velocidades de 5 o 10 segundos.
- Evitar los cables de conexión largos, ya que pueden ocasionar interferencias o ruido no deseado.
- Evitar mediciones durante días lluviosos o con mucho aire, por que se provocan interferencias.
- Evitar las mediciones cerca de caminos transitados con vehículos pesados, por lo que pueden ocasionar ruido en el registro.

Acerca del procesamiento de los datos propone:

- Utilizar 10 ventanas de 10 segundos y realizar un estudio estadístico.
- Combinar de algún modo el efecto de las componentes horizontales.

- Suavizar los espectros con una ventana triangular logarítmica.
- Tomar el promedio geométrico de los cocientes de cada ventana.

Los resultados de utilizar el método de Nakamura son variados, por lo que Vázquez-Rosas (2002) en su investigación escribe, que se realice una especie de *Blind Prediction* (predicción ciega), en la que distintos grupos de trabajo analicen y procesen datos de microtemores y, al final, se comparen los resultados obtenidos. Esto con el objetivo de hacer una guía para el registro y el análisis de microtemores.

Aun así, el método de Nakamura es sumamente utilizado para estudios de microzonificación, obteniendo, en la mayoría de los casos, información de la frecuencia fundamental, pero amplificaciones subestimadas. Otros métodos utilizados para la estimación de efectos de sitio a partir de registros de los eventos sísmicos, son las funciones de receptor que se basan en registros telesísmicos y los métodos que utilizan esquemas de inversión simultánea (Vázquez-Rosas, 2002).

III.11 Relación suelo-microzonificación sísmica

Se sabe que la intensidad y la cantidad de los daños no es solo función de la magnitud del sismo y de la distancia epicentral, la sacudida del terreno varía significativamente de un sitio a otro y depende de la conformación del subsuelo y de la forma del terreno (Sauter, 1989). Se ha determinado que la aceleración asociada con las ondas sísmicas aumenta en la superficie al pasar de un lecho rocoso (alta velocidad) a través de un estrato de sedimentos blandos (baja velocidad), este aumento depende de la relación de las velocidades de propagación en los dos medios y del espesor de suelo. Así, las condiciones locales del subsuelo tienen un efecto sobre la amplitud del movimiento en la superficie, y en general la intensidad de la sacudida del terreno y la cantidad de daños serán mayores en suelos blandos sin consolidar que en suelo firme o rocoso (Sauter, 1989).

A continuación se presentan algunos de los aspectos más importantes relacionados entre la interacción del suelo y las construcciones, ya que existe una relación directa entre la estructura y las características dinámicas del terreno sobre el que están desplantadas. Y la diferencia entre estas características dinámicas (Periodo fundamental) del terreno, es lo que dará diferentes zonas de comportamiento sísmico para una región.

a. Frecuencia y Periodo fundamental

En la mayoría de los casos en donde se tienen suelos blandos sobreyacentes a basamentos rocosos, se amplifica la vibración sísmica provocando grandes desastres, por ejemplo San Francisco en 1906, Caracas en 1967, y Ciudad de México en 1985. Dicha amplificación depende de una serie de factores los cuales se enlistan a continuación:

- Espesor de la cobertura del substrato.
- Topografía del terreno.
- Propiedades del suelo (rigidez, peso volumétrico).
- Tipo de sismo (magnitud, distancia al hipocentro).
- Mecanismo del sismo y su direccionalidad.

Pero la mayor amplificación ocurre cuando el suelo empieza a resonar bajo la influencia de la onda sísmica.

En lo que se refiere a la topografía, se han observado efectos de amplificación de las ondas sísmicas en los bordes de los valles, en la cima de los montes y en depósitos de suelos blandos con respecto a sitios en terreno firme y plano, es decir, que la vibración en la cima de una determinada colina puede ser mayor que la que se presenta en la base. Tal fue el caso de Canal Beagle en Viña del Mar, Chile, durante el terremoto del 3 de marzo de 1985, en donde los sismogramas instalados en la cima y crestas de las colinas mostraron claramente la amplificación del movimiento con respecto a sismogramas del mismo evento registrados en estaciones situadas en el valle y en suelo rocoso. Otro caso fue al sur de Italia durante el terremoto de Campania-Basilicata en 1980, donde la cuantía y severidad de los daños fue superior en la cima de los montes. También en el terremoto de San Fernando California en 1971, se registraron una serie de replicas, donde se observó en los sismogramas de velocidad un factor de hasta 10 veces mayor para estaciones situadas en la cima de los montes respecto a estaciones en el valle (Sauter, 1989).

El comportamiento de los edificios va a depender de las características de los sismos susceptibles de afectar el área urbana, que van a producir vibraciones con diferente contenido espectral en función de su magnitud y distancia al sitio de interés. Debido a esto, cada tipo de sismo va a producir efectos mayores o menores sobre tipos específicos de estructuras, cuestión que debe tomarse en cuenta al planificar la futura ubicación de las nuevas edificaciones, en las zonas de desarrollo urbano.

Las ondas sísmicas pueden afectar a los edificios de diferentes maneras, como por ejemplo: los movimientos horizontales (aceleración) de la superficie son transferidos al edificio, creando fuerzas que actúan sobre éste; dicha aceleración es mayor cuando la estructura entra en resonancia. La resonancia se presenta cuando el período característico local del movimiento del suelo (período de vibración que corresponde a la frecuencia fundamental del suelo), coincide con el período natural de la estructura (que es la medida de la tendencia natural de vibrar), provocando un incremento en la oscilación de la misma, que con una determinada duración puede ocasionar daños parciales o totales como su colapso definitivo.

La frecuencia natural de los edificios tiende a ser menor cuando son más pesados (más masa) o más flexibles (menos rígido). Uno de los principales aspectos que afecta la rigidez de un edificio es su altura, los edificios altos tienden a ser más flexibles, presentando frecuencias naturales bajas (periodos altos), en comparación con edificios de poca altura (Figura 14). En la Tabla 5 se muestra una relación entre el número de niveles de una construcción con la frecuencia natural del mismo y su respectivo período propuesto por la UNESCO RAPCA.

b. Tipo de estructura Frecuencia natural (Hz) Periodo fundamental (s)

Los eventos sísmicos pueden provocar interrupción y daños en las actividades socio-económicas e infraestructura de una región en particular. El grado de afectación está en función del grado de vulnerabilidad de las mismas. La experiencia ha demostrado que con una acertada planificación y la aplicación de medidas preventivas y correctivas para reducir la vulnerabilidad se puede minimizar el efecto de la ocurrencia de un evento sísmico. Por lo tanto, el conocer el nivel de exposición sísmica y la vulnerabilidad de las edificaciones en una determinada ciudad, permitirá a las instituciones y autoridades correspondientes utilizar dicha información para la preparación de planes relacionados con el uso del suelo, planificación urbana e implementación del uso de

reglamentos de diseño y construcción, que aseguren un comportamiento adecuado de las estructuras cuando ocurra un evento sísmico.

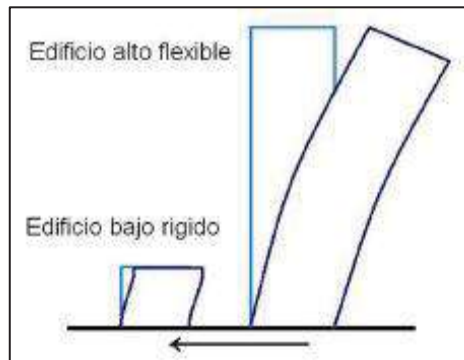


Figura 14.-Efecto de la altura de un edificio ante la acción de una fuerza horizontal de un evento sísmico (adaptado de UNESCO RAPCA).

Tabla 5.- Ejemplos de frecuencias y periodos para edificios (modificado de UNESCO RAPCA)

Tipo de estructura	Frecuencia natural (Hz)	Periodo fundamental (Seg.)
Un nivel	10	0.1
3-4 niveles	2	0.5
Edificios altos	0.5 – 1.0	2.0-1.0
Rascacielos	0.17	5.8

c. Influencia del suelo.

Numerosas investigaciones recientes han demostrado que, aún en una misma localidad, las variaciones de las características del suelo local ejercen una enorme influencia en el patrón de distribución de daños en edificios, y en la amplitud y contenido de frecuencias de los movimientos del terreno registrados en la superficie de los depósitos ante la acción de un sismo. Así por ejemplo, en zonas en las que los depósitos están formados por materiales granulares y suelos saturados, su tendencia a compactarse puede originar presiones hidrostáticas excesivas capaces de producir licuefacción del suelo, dando como resultado grandes asentamientos y volcamientos de estructuras tal y como se observó en el terremoto de Niigata, Japón en 1964, y/o deslizamientos de taludes como los que se produjeron en la terraza de Turnagain en la ciudad de Anchorage, Alaska, durante el terremoto del 27 de marzo de 1964. Es evidente que los urbanistas e ingenieros desconocían el peligro potencial del suelo de cimentación del lugar.

Es importante observar que en la planificación urbana debe tomarse muy en cuenta el peligro potencial que representa el construir cerca de zonas geológicamente inestables, o en terrazas propensas a deslizamiento, aunque a primera vista no sean evidentes. La aceleración máxima del terreno no es el único factor que determina por sí solo el daño ocasionado en estructuras civiles durante la acción de un terremoto. El daño, en general, depende de la velocidad y de la duración de las sacudidas. Por ejemplo, una aceleración muy alta desarrollada durante un intervalo de tiempo muy corto causará poco daño estructural. Por el contrario, un movimiento del terreno con amplitud de aceleraciones relativamente bajas pero continuas que se mantienen uniformes durante un intervalo de tiempo de varios segundos pueden ocasionar daños considerables en cierto tipo de estructuras. Este efecto se manifestó durante el terremoto del 19 de septiembre de

1985 en la ciudad de México; en este evento la aceleración máxima registrada varió entre 0.05 g y 0.19 g, pero las características del contenido de frecuencias y la duración de las sacudidas fueron suficientes para causar el completo colapso de 256 edificios de varios pisos. La magnitud del terremoto alcanzó 8.1 en la escala de Richter y la distancia epicentral fue superior a 380 kilómetros, figura 15 (Alonso, 1993).

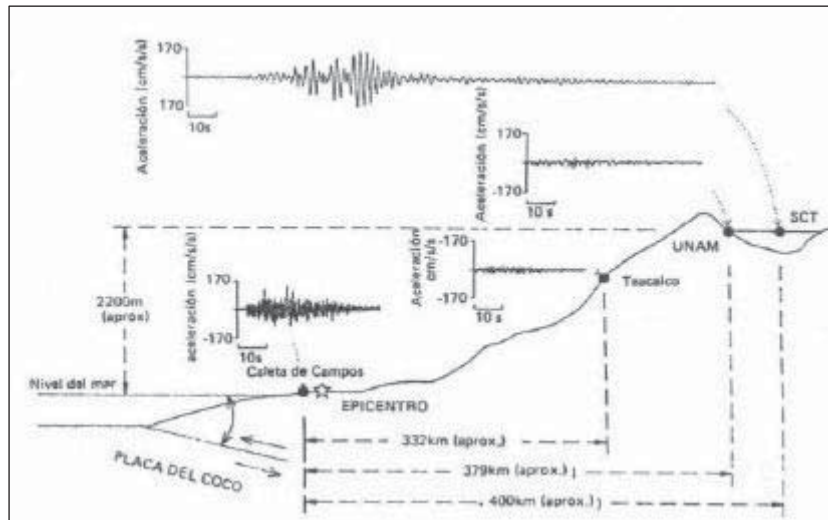


Figura 15.-Sección esquemática de algunas estaciones que registraron el sismo de Michoacán en 1985, donde se presenta la componente E-O de los registros de aceleración. Muestran la atenuación de la amplitud con la distancia en la estación Teacalco, condición que no se cumple para la estación UNAM, a pesar de estar más alejada de la fuente sísmica en donde se observa una respuesta mayor que en la estación de Teacalco. Y a una distancia mayor pero sobre suelos sedimentarios del valle de México (zona de lago) en la estación SCT se registró la mayor amplitud de ondas, lo cual no cumple con la condición de atenuación del movimiento respecto a la distancia, en este caso debido al tipo de suelo. Fuente: Fundamentos de Ingeniería Sísmica, Tomo I, Introducción a la sismología. Sauter F., Franz (1989).

III.12 Antecedentes de Microzonificaciones Sísmicas

El estudio de los microtremores como un método de microzonificación sísmica se ha llevado a cabo en varios países. En Japón, Kanai, *et al.* (1954; en Aguilar-Bardales y Alva-Hurtado, 1991) utilizaron este método hace más de 50 años para hacer una clasificación del suelo, habiéndose utilizado después dichos resultados en el reglamento sismorresistente del Japón. Algunas ciudades en las que se han hecho trabajos de microzonificación son: Tokio, Tsukuba y Kawasaki. En 1981 esta metodología fue utilizada en Indonesia para realizar la microzonificación sísmica de la capital Jakarta. En tanto que en Chile se ha realizado la microzonificación sísmica de varias ciudades (Lástrigo y Monge, 1972; Thomas, Monge y Saragoni, 1980; en Aguilar-Bardales y Alva-Hurtado, 1991).

En Perú se han realizado ensayos de medición de microtremores en Chimbote (Morimoto *et al.*, 1971; Hermoza, 1972; Alva-Hurtado *et al.*, 1986) in (Aguilar-Bardales y Alva-Hurtado, 1991), en Huaraz (Kuroiwa *et al.*, 1973; Alva Hurtado *et al.*, 1986) in (Aguilar-Bardales y Alva-Hurtado, 1991), en La Molina, Lima (Martinez, 1989) in (Aguilar-Bardales y Alva-Hurtado, 1991), Nueva Ciudad Majes, Cusco y Tacna (Tokeshi, 1990) in (Aguilar-Bardales y Alva-Hurtado, 1991),

Arequipa (Aguilar-Bardales y Alva-Hurtado, 1991) con valores en los periodos dominantes que varían de 0.1 hasta 4.5 segundos, y últimamente en las ciudades de Moquegua, Piura, Rioja, Moyobamba y Soritor.

En Cuba, trabajos de microzonificación se han reportado en las ciudades de la Habana y Santiago (González-Raynal y Pérez-Lara, 2000), recurriendo al uso de los microtemores y el método de Nakamura, obteniendo valores de los periodos dominantes en Santiago de Cuba que varían entre 0.1 a 1.2 s, mientras que en la Habana los periodos máximos no sobrepasan los 0.6 s; y en la región urbana del municipio de Mariel (González-Raynal *et al.*, 2002), utilizando los microtemores encuentran periodos dominantes del orden de 0.1 a 0.64 s.

Otras investigaciones de microzonificación sísmica se han realizado en Barcelona, España; en Colombia en las ciudades de Bogotá, Neiva, Ibagué, Tunja, Santiago de Cali, Villavicencio, Barrancabermeja y últimamente en Pereira, Desquebradas y en Santa Rosa. En Managua, Nicaragua. En las ciudades de Panamá, David y Colón en la República de Panamá. En Caracas, Venezuela; en San José y San Ramón, Costa Rica, recurriendo al uso de los microtemores, se obtienen valores para los periodos dominantes del terreno de 0.1 a 2.5 s en San José y valores de 0.1 a 0.9 s en San Ramón.

Como se puede observar, el uso de los microtemores en la determinación de los periodos dominantes del terreno, es muy utilizado a nivel mundial, y en el caso nuestro país no es la excepción.

Aunque la Ciudad de México se encuentra ubicada en la zona sísmica B, debido a las condiciones locales del subsuelo del valle de México pueden esperarse altas aceleraciones. La Red Acelerométrica de la Ciudad de México (RACM) que cuenta con cerca de 100 estaciones en la superficie libre del terreno, presenta un mapa de contornos con los periodos dominantes del terreno con valores de 0.5 s para el terreno firme, y de 5.0 segundos para las zonas más profundas del lago, (Pérez Rocha *et al.*, 1996). Lermo *et al.*, (1995) *in* Torres-Morales, (1995) realizaron estudios de microzonificación preliminares en las ciudades de Xalapa, Veracruz; también se ha hecho la zonificación de Tlaxcala (Bernal y Lermo, 2005). Se tienen antecedentes de microzonificación sísmica en algunas de las principales ciudades del país, como son: Acapulco, Guadalajara, Puebla, Oaxaca, y otros trabajos más recientes en Colima, Manzanillo y Tecomán.

Investigaciones más específicas y locales encaminados a la zonificación sísmica que se han realizado en el Estado de Michoacán, como los trabajos de microzonificación sísmica para las ciudades de Morelia, Uruapan, Zamora, Pátzcuaro y Zitácuaro.

En 1993, M. Jara, F. Hurtado y J. M. Jara, presentaron en el X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica llevado a cabo en Puerto Vallarta, Jalisco la zonificación sísmica de la ciudad de Morelia en la que se muestran las curvas de isoperiodos del terreno de la ciudad, obtenidas con base en mediciones de campo de vibración ambiental de 84 sitios dentro del área urbana de los que se determinaron los periodos naturales del terreno y que comprenden entre 0.24 segundos y 0.58 segundos los cuales corroboraron utilizando información de 16 sondeos profundos, recomendando finalmente mediciones adicionales y recopilación de mayor información que permitan presentar recomendaciones definitivas.

En 1999, Lermo-Samaniego *et al.*, proponen un mapa de microzonificación de peligros de la ciudad de Morelia, utilizando los microtemores y el método de Nakamura para la obtención de los periodos dominantes del terreno en 17 sitios, obteniendo valores de los periodos dominantes de 0.2 hasta 1.0 segundos.

En 2002 Vázquez-Rosas *et al.*, proponen la microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan, presentada en un mapa de curvas de isoperiodos de la ciudad, obtenido a partir del análisis de la vibración ambiental (microtemores) registrados en 54 sitios con el método de Nakamura, encontrando periodos dominantes máximos del orden de 0.60 segundos (s) y mínimos de 0.10 s.

En 2005 Vázquez-Rosas *et al.*, presentaron una propuesta de microzonificación sísmica de la ciudad de Zamora, empleando el método de Nakamura, y basándose en la medición de la vibración ambiental (microtemores) en 30 sitios de la ciudad como resultado obtuvieron valores de periodos fundamentales del terreno, que varían entre 0.5 s y 3.0 s. y el mapa de isoperiodos.

En 2006 Chávez Hernández José *et al.* Presentaron los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad de Pátzcuaro Michoacán en la que emplearon el método de Nakamura. En los estudios definieron 21 sitios distribuidos en la ciudad de los cuales obtuvieron el período dominante del terreno y generaron su respectivo mapa de isoperiodos, concluyendo que en las inmediaciones del lago se presentan periodos cercanos a 1.0 segundos, al Oriente de la ciudad periodos dominantes de 0.2 a 0.6 segundos y al Sur hasta de 3.7 segundos. También analizaron en laboratorio muestras de terreno con la finalidad de relacionar los resultados con los periodos dominantes obtenidos.

En el 2008 Vázquez Rosas Ricardo, Aguirre González Jorge y Mijares Arellano Horacio, en la Reunión Anual de Geofísica realizada en Puerto Vallarta, presentaron la propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Zitácuaro Michoacán en la que usaron el método de Nakamura. Realizaron mediciones de vibración ambiental en 69 sitios de la ciudad, con los registros de los microtemores calcularon los cocientes H/V y observaron periodos entre 0.2 segundos y 3.0 segundos de los cuales los más altos los encontraron hacia el sur de la ciudad y los periodos bajos en la parte norte.

IV. JUSTIFICACIÓN

Con la modernización del puerto internacional Lázaro Cárdenas, y el desarrollo significativo de su industria metalúrgica, turística y de servicios; actualmente la ciudad de Lázaro Cárdenas se proyecta con un alto desarrollo y potencial económico. De la misma manera y en consecuencia de lo anterior, en los últimos veinte años su población y vivienda se han visto incrementados en más del doscientos por ciento. Desde el punto de vista del riesgo sísmico, por un lado, la ciudad de Lázaro Cárdenas presenta una elevada peligrosidad (probabilidad de ocurrencia), debido a que se ubica en una de las regiones más sísmicas del país; y por el otro lado, el crecimiento de su industria, población y vivienda, hacen que sea altamente vulnerable al efecto sísmico. El diseño de la infraestructura de la ciudad, que considere el periodo dominante del movimiento que el terreno puede presentar durante un evento sísmico, constituye un elemento fundamental para el abatimiento de la vulnerabilidad y en consecuencia riesgo sísmico de la ciudad de Lázaro Cárdenas.

Con base en lo anterior, en este trabajo se realizó la microzonificación sísmica de Lázaro Cárdenas aplicando la técnica de Nakamura, que permitió la obtención de mapas de isoperiodos de la ciudad, en donde se indican los períodos dominantes del movimiento que el terreno puede presentar durante un evento sísmico.

Este trabajo se proyecta como insumo fundamental para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras de las edificaciones existentes, especialmente aquellas de uso vital tales como hospitales, colegios, dependencias gubernamentales y cuerpo de bomberos, entre otros. Además del riesgo sísmico de la ciudad, análisis de respuesta dinámica del terreno, evaluación de interacción suelo-estructura civil, creación de códigos para el diseño obras civiles, planificación urbana, responsabilidad gubernamental, compañías de seguros y planes de defensa civil.

V. OBJETIVOS

V.1. Objetivo general.

Clasificar a la ciudad de Lázaro Cárdenas en diversas zonas de acuerdo al período dominante del terreno, y su posible comportamiento ante eventos sísmicos (microzonificación sísmica) representado por un mapa de isoperiodos.

V.2. Objetivo particular.

Para cumplir con el objetivo general fue necesario lograr los siguientes objetivos particulares: revisión bibliográfica; recopilación de material cartográfico e informes técnicos; entrevistas con autoridades municipales para dar a conocer los trabajos a realizar, y gestionar permisos y apoyo logístico durante el reconocimiento del área y trabajo de campo; registro de ruido ambiental en campo; edición y procesamiento de datos; y finalmente, construcción del mapa de isoperiodos.

VI. HIPÓTESIS

De acuerdo a investigaciones, experiencias y estudios similares a los de este trabajo, realizados por varias instituciones y personas en diversos lugares del país y del mundo, se ha logrado comprender mejor el comportamiento dinámico del terreno ante eventos sísmicos. Con base en lo anterior, se plantea como hipótesis de este trabajo que el terreno ocupado por la mancha urbana de la ciudad de Lázaro Cárdenas, es diverso en su comportamiento dinámico lo cual se manifestará en la variación de los periodos dominantes del mismo.

VII. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

VII. 1 Localización

La ciudad de Lázaro Cárdenas, cabecera del municipio del mismo nombre, se localiza en el sector oriental de la costa del estado de Michoacán (Figura 16), en las siguientes coordenadas geográficas extremas: Latitud norte $17^{\circ} 54'$ (min) y $18^{\circ} 15'$ (máx), y longitud oeste $102^{\circ} 7'$ (min) y $102^{\circ} 48'$ (máx). Con una altitud media de 10 msnm. El área de estudio se localiza dentro de la mancha urbana de la ciudad de Lázaro Cárdenas, polígono de la figura 15. Limita al norte con instalaciones del aeropuerto, al este con el río Balsas, y al sur con las instalaciones de Acelor Mittal (antes Sicartsa).

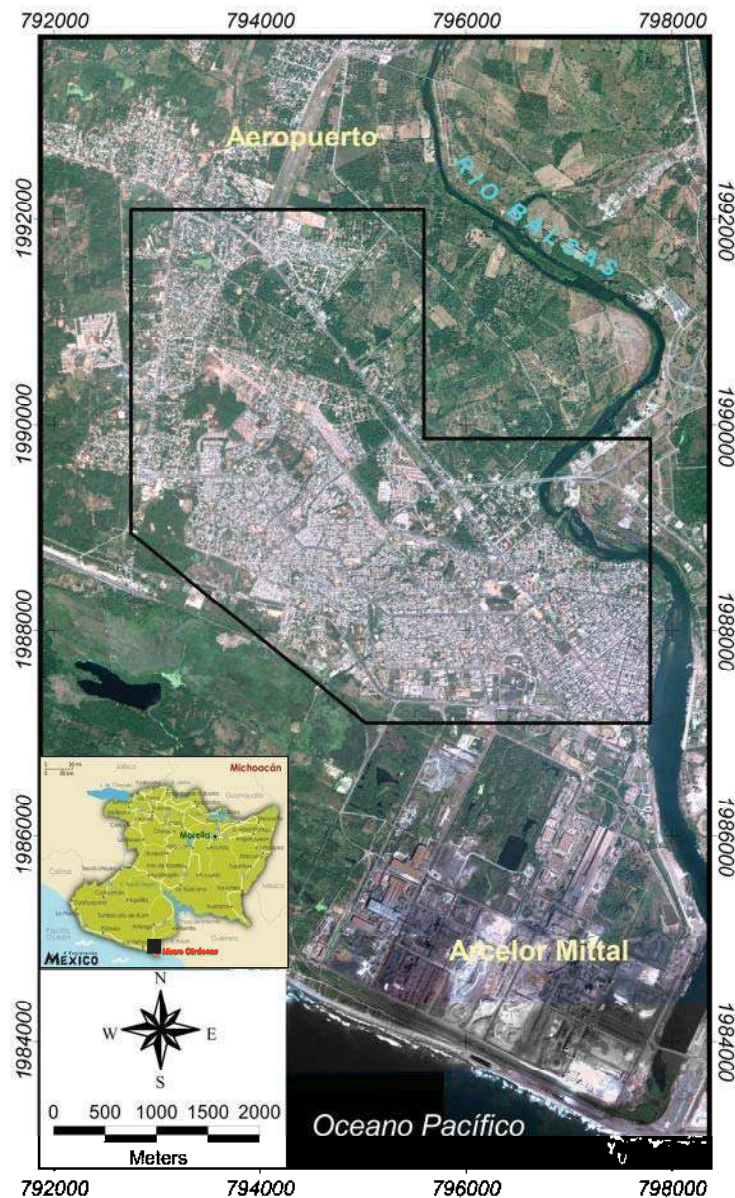


Figura 16.- Localización del área de estudio (polígono) dentro del contexto urbano de la ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

VII. 2 Población y vivienda

Con base en los registros de los censos de población realizados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), en los años 1980 y 2000, la ciudad de Lázaro Cárdenas presentaba una población total de 61,870 habitantes (INEGI, 2000) y 169,996 habitantes (INEGI, 2005), respectivamente, lo cual significa que la población aumentó en un 275 % en 20 años y la vivienda incrementó 332 % durante el mismo periodo, posteriormente la población y vivienda también incrementaron al igual que en la actualidad se observa entendimiento de la mancha urbana alrededor de la ciudad.

La ciudad Lázaro Cárdenas fue fundada en 1931, pero su población y vivienda ha incrementado notablemente en los últimos 25 años (estadísticas de INEGI).

En la figura 17 se muestra el incremento de población y vivienda en Lázaro Cárdenas

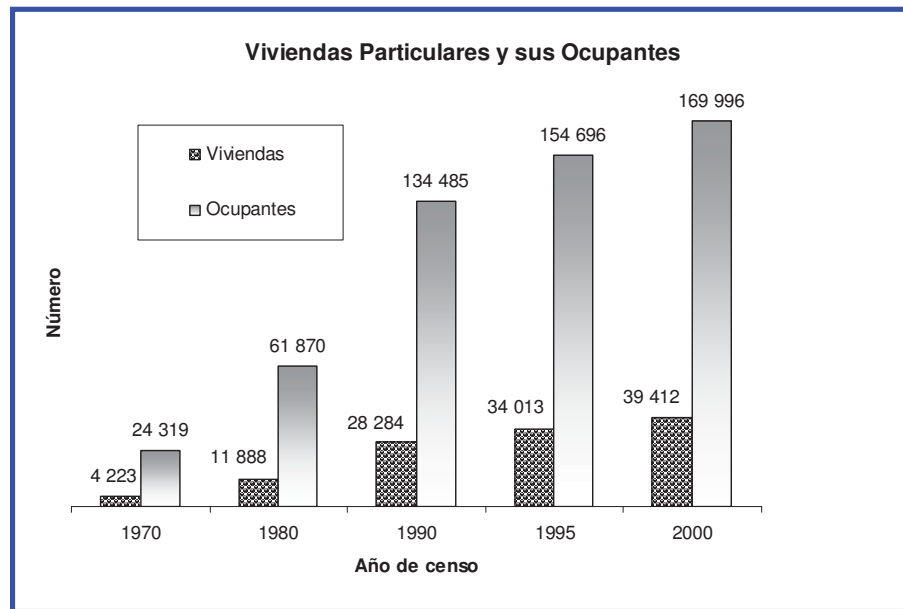


Figura 17.- Incremento de población y vivienda en Lázaro Cárdenas (INEGI, 2005)

VII. 3 Transporte y medios de comunicación.

Lázaro Cárdenas tiene comunicación por carretera pavimentada a Morelia en sus tramos Morelia-Uruapan, Uruapan-Playa Azul, entroncando en La Mira con La Mira-Lázaro Cárdenas y la carretera costera lo comunica con Colima y Guerrero. Cuenta con caminos de terracería a casi todas las comunidades rurales. Dispone de servicio de ferrocarril, tiene aeropuerto en la cabecera municipal y pistas de aterrizaje en algunas localidades (Figura 18). Cuenta con teléfono, correo, telégrafo, telex, televisión, taxis, urbanos y suburbanos de carga, materialistas y autobuses foráneos y telefonía celular.

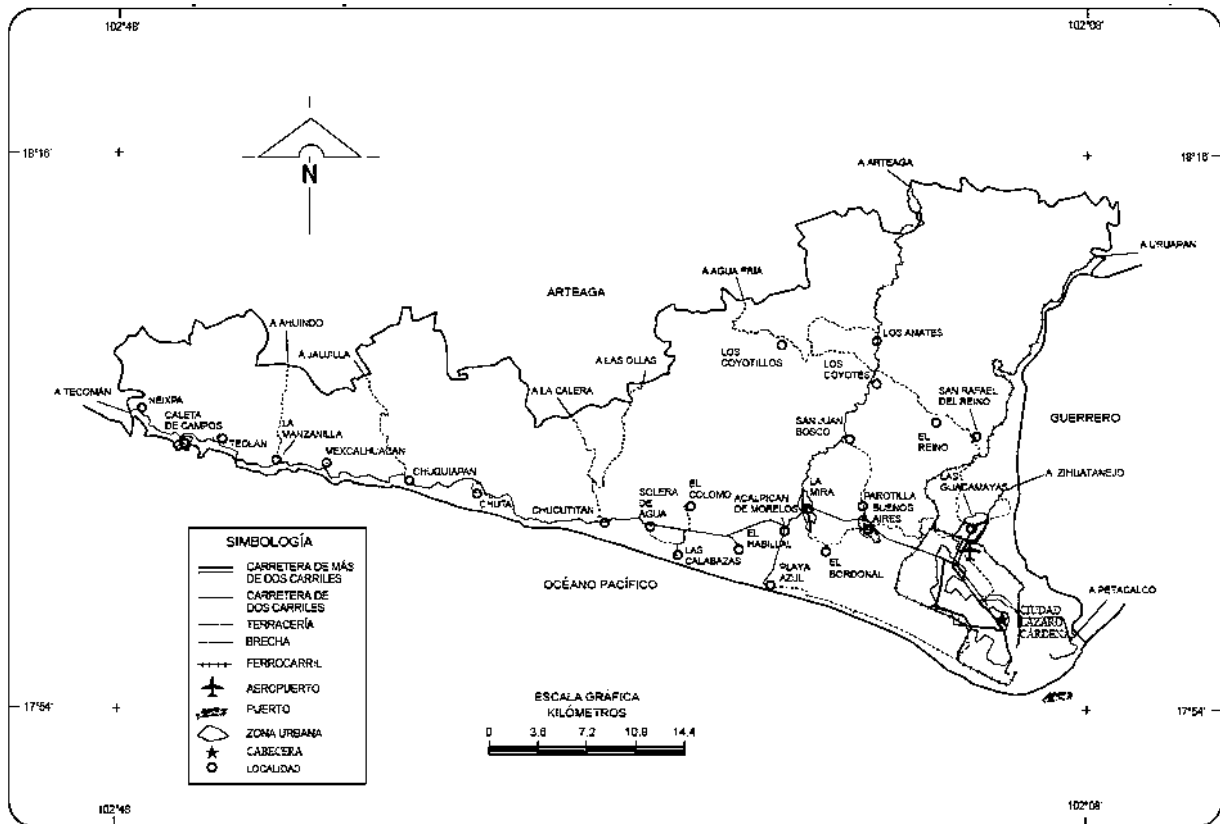


Figura 18.- Infraestructura del transporte (INEGI,2005; conjunto de datos Geográficos de las cartas topográficas escala 1:50 00 y 1:250 000)

VII. 4 Geodinámica y Geología Regional

Michoacán se encuentra en el límite de dos placas tectónicas (Pacífica y Norteamericana), además de estar ligado al movimiento de subducción de otra micro placa (Cocos).

Michoacán está ubicado en el límite de dos provincias geológicas, al sur del estado la Sierra Madre del Sur, y al norte el Cinturón Volcánico Transmexicano (Figura 19) este último, causante de la formación de varios volcanes dentro y fuera del estado; el más reciente de ellos el Parícutín (1943).

Por su parte, Garduño (1999) afirma que los arcos volcánicos del Mesozoico (terreno Guerrero) y la Tectónica edificaron a la Sierra Madre del Sur, ésta es una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias donde se desarrollaron algunas incipientes plataformas calcáreas o en otros casos secuencias distales de rocas terrígenas tipo turbiditas. Estas secuencias han sido deformadas por dos fases plicativas durante el Cretácico superior, por una tectónica de fallas transcurrentes del Mioceno y por una tectónica primero transtensiva y después distensiva, que afecta al Cinturón Volcánico Transmexicano.

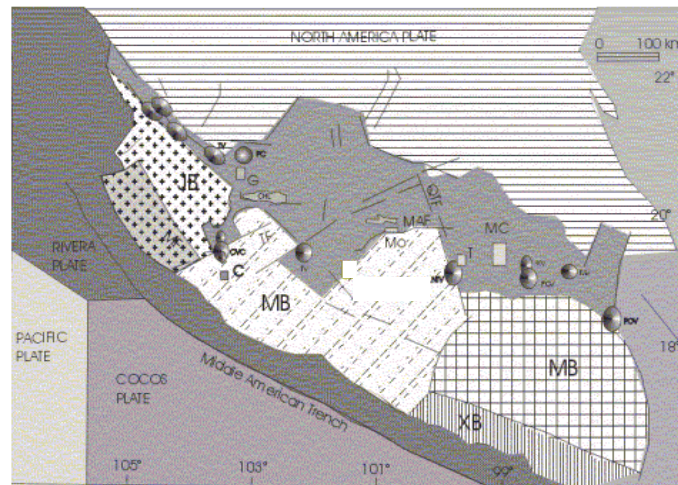


Figura 19.- Mapa geodinámico de la región de Michoacán.

VII.5. El campo de esfuerzos en el estado

En la figura 20, podemos observar que el campo de esfuerzos en el estado se divide en: a). la zona de compresión (σ_1) NE-SW ligada a la subducción de la placa de Cocos y b). la zona de fragmentación de la Placa de Norteamérica, con un (σ_3) de orientación NNW-SSE. Este campo de esfuerzo ha generado que la columna litológica del estado sea afectada por una serie de estructuras de orientación NW-SE reactivadas a fallas laterales derechas, fallas NE-SW con una componente normal lateral izquierda y fallas E-W con una componente lateral izquierda.

Existen zonas donde los patrones generales de esfuerzo no coinciden, es el caso del Graben de Penjamillo, el cual es una estructura N-S que está afectando a aparatos monogenéticos que por su morfología son considerados del Holoceno-Pleistoceno. El Graben de Penjamillo parece obedecer a un sistema normal transtensional derecho de orientación NNW-SSE. Otra estructura la conforma el Semigraben de Penjamillo, el cual tiene una orientación NW-SE, paralelo a lo que se ha denominado falla Chapala-Oaxaca y que ha formado la depresión de Tepalcatepec.

Dentro del Cinturón Volcánico Mexicano todos los mecanismos focales muestran una componente de σ_3 de orientación general N-S o NNW-SSE, han sido los casos de los sismos de Acambay 1912, Maravatío en 1979, y la actividad reciente de la falla Maritaro en el campo Geotérmico de Los Azufres. Dentro de la Ciénega de Chapala la Red sismológica Nacional reporta sismos en esta depresión lacustre.

Estudios de Morfología y Paleosismología llevados a cabo en diferentes segmentos del sistema de fallas Morelia-Acambay han mostrado una actividad sísmica de algunos segmentos.

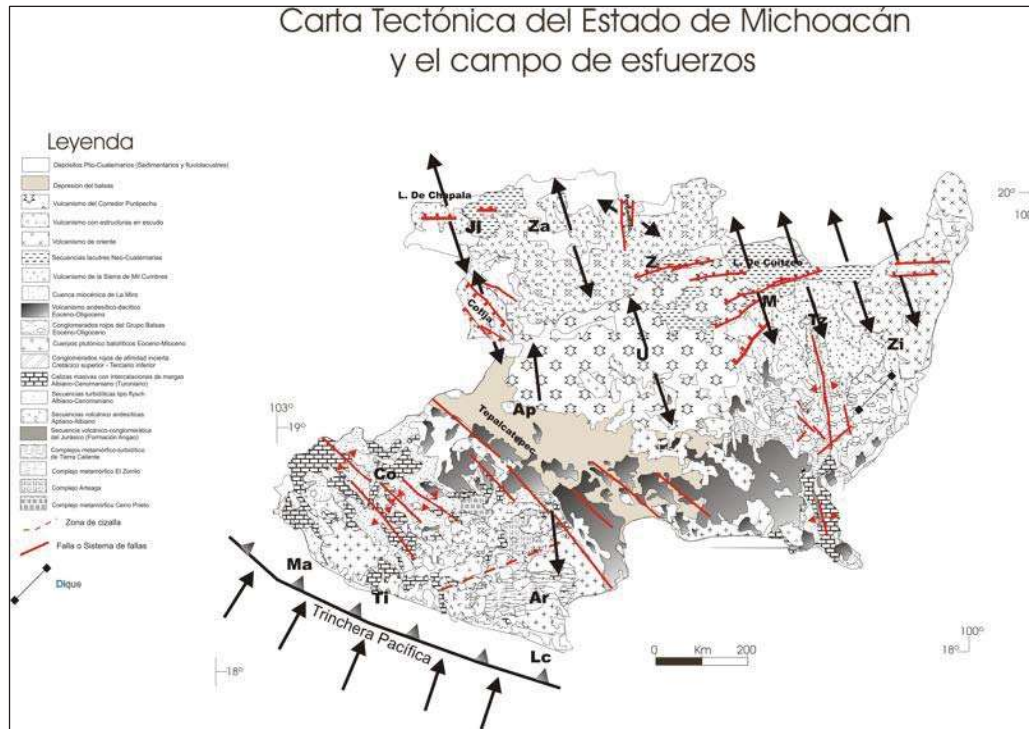


Figura 20. Campo de esfuerzos del Estado de Michoacán ligado a la sismicidad

VII. 6 Geología local.

Geomorfológicamente la ciudad de Lázaro Cárdenas está en la zona costera de Michoacán, toda ella sometida a la dinámica, por un lado fluvial de los ríos Acapulcan y Balsas, por el otro lado de la línea de costa, donde se encuentran dunas, esteros y depósitos de playa los cuales se modifican en función del clima, de la neodinámica y de la actividad antropogénica.

Estratigráficamente el basamento en la ciudad de Lázaro Cárdenas se compone de rocas metamórficas de edad cretácica, que provienen de calizas, areniscas y lutitas. Estas rocas están afectadas por diques andesíticos del Terciario. Sobreyasido a las rocas ígneas y metamórficas, se tienen los depósitos continentales formados por una sucesión de gravas, arenas y limos de compacidad variable depositados en ambiente litoral.

Posteriormente se tienen depósitos fluviales provenientes de los ríos Balsas y Acapulcan, formados por gravas y arenas. En las cercanías de las costas se tienen dunas, formadas por arenas de grano fino que son los sedimentos más recientes, formados en el Cuaternario.

De acuerdo con la carta geológica de escala 1:250,000 del INEGI (2005), y los trabajos de campo, se pueden separar tres paquetes importantes (Figura 21):

- A. Secuencia vulcanosedimentaria del Triásico-Cretácico. Se conforma de una alternancia de depósitos carbonatados y terrígenos con una fuerte influencia de productos magmáticos de tipo andesítico y riolítico con metamorfismo dinámico.
- B. Granitos y granodioritas del Eoceno-Mioceno que generan en la secuencia A un metamorfismo de contacto e importante mineralización.
- C. Depósitos de secuencias terrígenas de origen fluvial o costero con espesores variables, en estos depósitos es donde se ha construido la Ciudad de Lázaro Cárdenas. Por sus litologías granulares y por su relación con los acuíferos, estas secuencias son las que generan los efectos de licuefacción que son los que más dañan a las obras civiles cuando se presenta un sismo de magnitud superior a 5.0 en la escala de Richter.

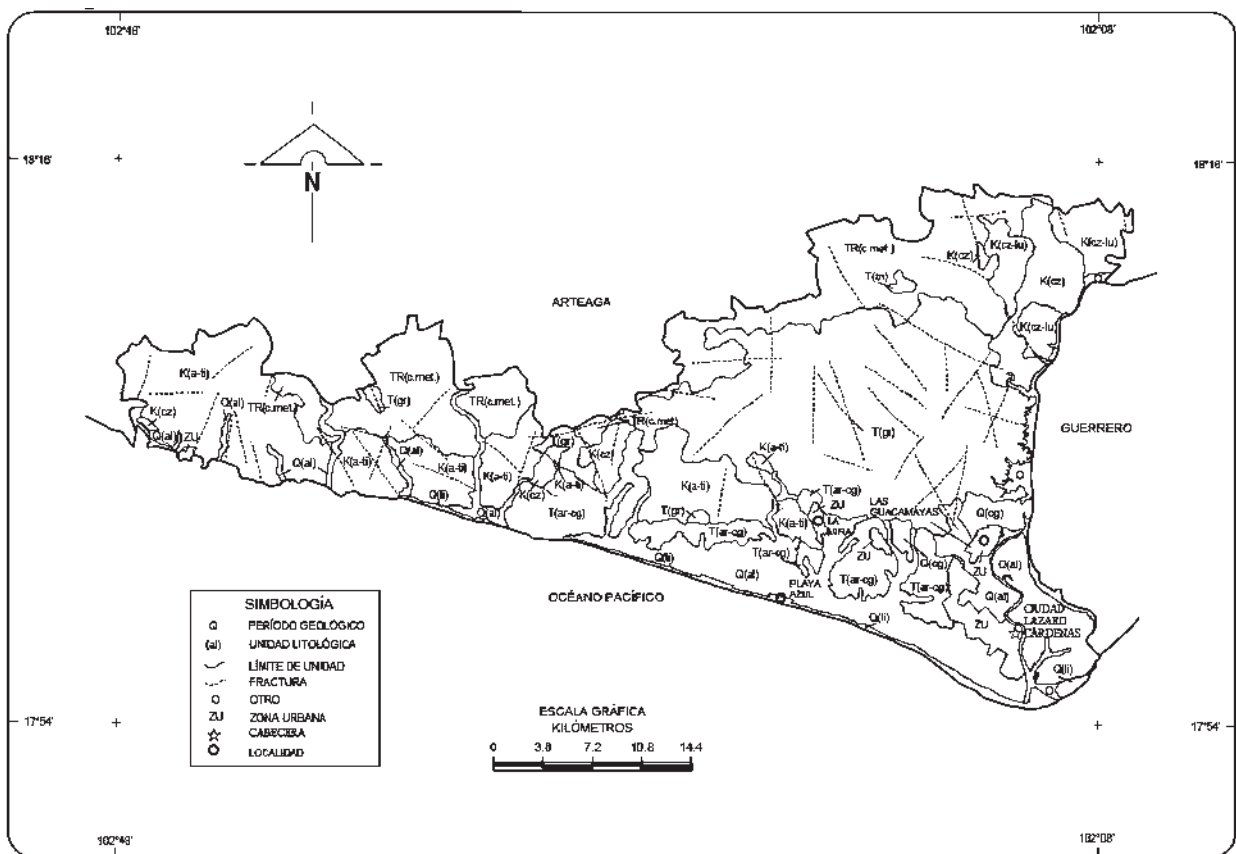


Figura 21.- Geología (INEGI 2005, conjunto de datos Geográficos de la carta geológica escala 1:250 000)

VIII. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del presente trabajo, el material utilizado consistió de cartas topográficas a escala 1:50,000, mapas urbanos tipo catastrales a escala 1:2,000, e imágenes de satélite obtenidas a partir del programa Google Earth. El equipo empleado durante los trabajos de campo consistió de:

- a). Acelerógrafo Altus Digital Recorder, modelo K2, marca KINEMATRICS con 12 canales de registro, tarjeta de memoria interna, conexión para antena GPS y sensor externo, con funcionamiento a base de energía eléctrica por medio de batería recargable interna (de 10.5 voltios a 15 voltios) o por energía externa (100-250 voltios) (Figura 22). Cuenta con el programa QuickLook para almacenamiento, despliegue, edición e impresión de datos de eventos registrados; además del programa QuickTalk para la transmisión de datos a computadora por medio de cable (RS-232) o a través de modems.



Figura 22.- Vista del interior del acelerógrafo Altus Digital Recorder, modelo K2, marca KINEMATRICS.

- b). Sensor EpiSensor triaxial, para la obtención de movimientos de vibración en tres componentes al mismo tiempo, direcciones horizontales (X y Y), y dirección vertical (Z). Funciona con energía eléctrica por medio de conexión al acelerógrafo (Figura 23)



Figura 23.- Vista de la parte superior del Sensor EpiSensor triaxial.

- c). GPS tipo navegador, marca Garmin, modelo Plus III; empleado para la obtención de coordenadas de coordenadas geográficas (grados, minutos) o UTM (x, y, z) de los puntos de registro donde se colocó el sensor anterior. Su margen de error es de aproximadamente 10 m (Figura 24)



Figura 24.- Vista frontal del GPS tipo navegador, marca Garmin, modelo plus III.

- d). Brújula tipo Brunton, utilizada para la orientación del sensor con el norte magnético. Con esto se garantiza que los movimientos horizontales registrados efectivamente sean en la dirección X-Y (Figura 25)



Figura 25.- Brújula tipo Brunton

- e). Computadora portátil, para comunicación con el acelerógrafo, disparo y paro de registros, así como para la revisión y almacenamiento de datos en campo (Figura 26)

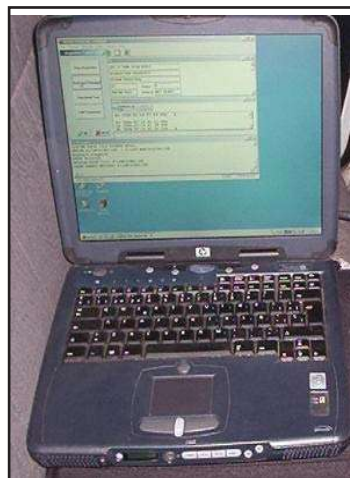


Figura 26.- Vista frontal de la computadora portátil.

f). Otros accesorios empleados fueron: cámara fotográfica, vehículo para transporte de equipo, transformador de energía de 12 voltios de entrada (conexión en automóvil) a 120 voltios de salida para conectar al acelerógrafo, entre otros.

En lo que respecta a la metodología, como es bien sabido ésta es la sucesión de actividades que toman en cuenta los aspectos que intervienen en la realización de un trabajo o investigación desde su inicio hasta el final. La metodología utilizada en la realización del presente trabajo consistió de nueve etapas (Figura 27), y se detallan a continuación.

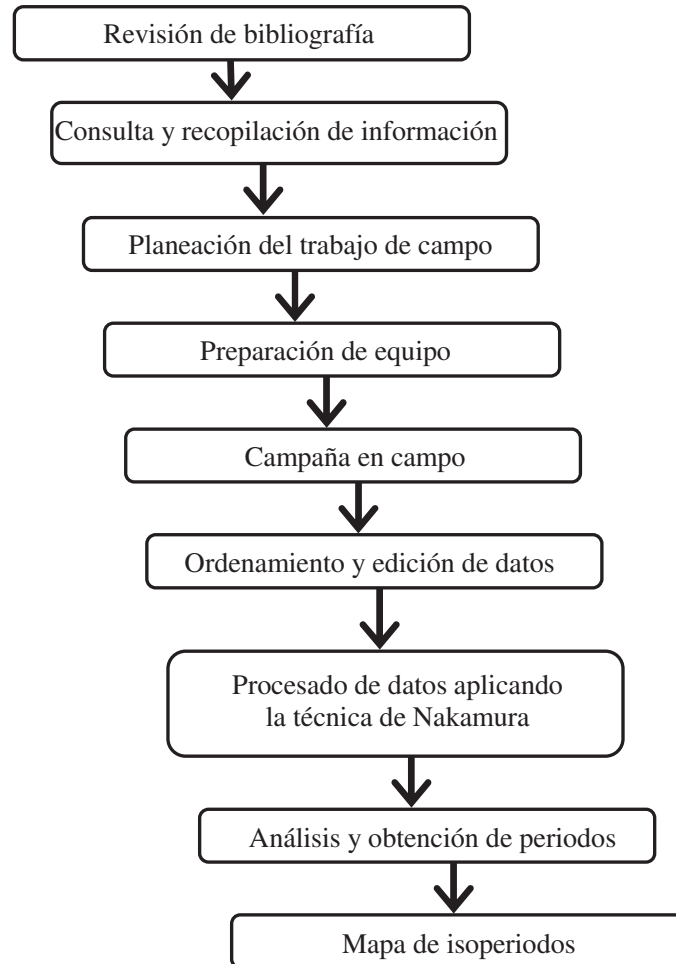


Figura 27.- Metodología general, aplicada en la microzonificación sísmica de la ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

- i. *Revisión de bibliografía.* Esta etapa se realizó a lo largo de todo el desarrollo de la investigación; y consistió en la revisión de bases de datos, colección y lectura de bibliografía relacionada con los temas involucrados en este trabajo.
- ii. *Consulta y recopilación de información.* Con el objetivo de recopilar información referente al historial sísmico de la ciudad, y datos útiles para el este estudio como tipo de terreno y estudios de mecánica de suelos, se consultaron diferentes dependencias

municipales tales como Protección Civil Municipal de Lázaro Cárdenas, Dirección de Obras Públicas y Desarrollo Urbano, CAPALAC (Comité de Agua Potable y Alcantarillado de Lázaro Cárdenas); Plantas tratadoras de Aguas Residuales I y II, Regidores del H. Ayuntamiento, SEMARNAT-CONAGUA, Administración Portuaria Integral (API), Laboratorio de Mecánica de suelos particular y CFE C.T. Pdte. Plutarco Elías Calles en Petacalco, Guerrero. La comunicación con las anteriores dependencias fue de gran ayuda en la investigación. Se logró difundir el proyecto y la idea del estudio, a demás se consiguió información referente a tipo de construcciones existentes y en proceso, tipo de terreno en algunas partes del área de estudio, recorridos por la ciudad que permitieron identificar posibles lugares para la medición de microtemores y posibles fuentes generadoras cercanas; principalmente se obtuvo autorización gubernamental para los recorridos, accesos en áreas restringidas y apoyo necesario.

iii. Planeación del trabajo de campo. En esta etapa del proyecto se realizó la distribución de los puntos de medición sobre el área de estudio. Para tal fin, el mapa catastral de la ciudad sirvió como mapa base, sobre el cual se definieron los puntos sobre los cuales se realizarían los registros de vibración ambiental (microtemores). Es importante mencionar que la ubicación de dichos puntos puede ser independiente de todos los demás, ya que las mediciones requeridas para el método de Nakamura, utilizado en este trabajo, son puntuales y sin relación con las de otros puntos. En consecuencia las mediciones se pueden realizar en diferentes lugares y a diferente tiempo. Un aspecto importante a considerar en la distribución de dichos puntos es la distancia entre ellos, la cual depende del nivel de detalle con que se quiera obtener el mapa final de isoperiodos. En este trabajo la distancia fue de entre 200 y 1000m, obteniéndose un total 83 puntos, en la figura 28 se observa la ubicación de dichos puntos. Otros criterios que se tuvieron en cuenta en la ubicación de los puntos de registro, fueron:

- a. No deben de estar sobre avenidas muy transitadas.
- b. No estén cerca de árboles muy grandes.
- c. No estén cerca de antenas de radio.
- d. No se encuentren cerca de postes de luz, torres o postes de alta tensión.
- e. No se localicen cerca de ríos.
- f. No deben quedar sobre rellenos de escombros, basura, pozos, norias, drenajes, etc.

iv. Preparación de equipo. En esta etapa se verificó el buen funcionamiento del acelerógrafo, sensor, cables y sus conexiones, previo al trabajo de campo. Se realizaron en gabinete mediciones de prueba. Se verificó la posibilidad de utilizar dos o tres equipos completos, cada uno con una brigada de personas, también se vio la posibilidad de contar con equipo adicional (disparador) conectado al acelerógrafo para enviar la señal de inicio y final de grabación de registro sin que se tuviera que utilizar la computadora portátil, entre otras cuestiones. Finalmente se decidió realizar la campaña de campo con un solo equipo y una brigada, utilizando computadora portátil como medio de comunicación con el acelerógrafo. También fue requerido instalar en dicha computadora el programa de comunicación y además definir entre las funciones del equipo la grabación por 15 minutos.

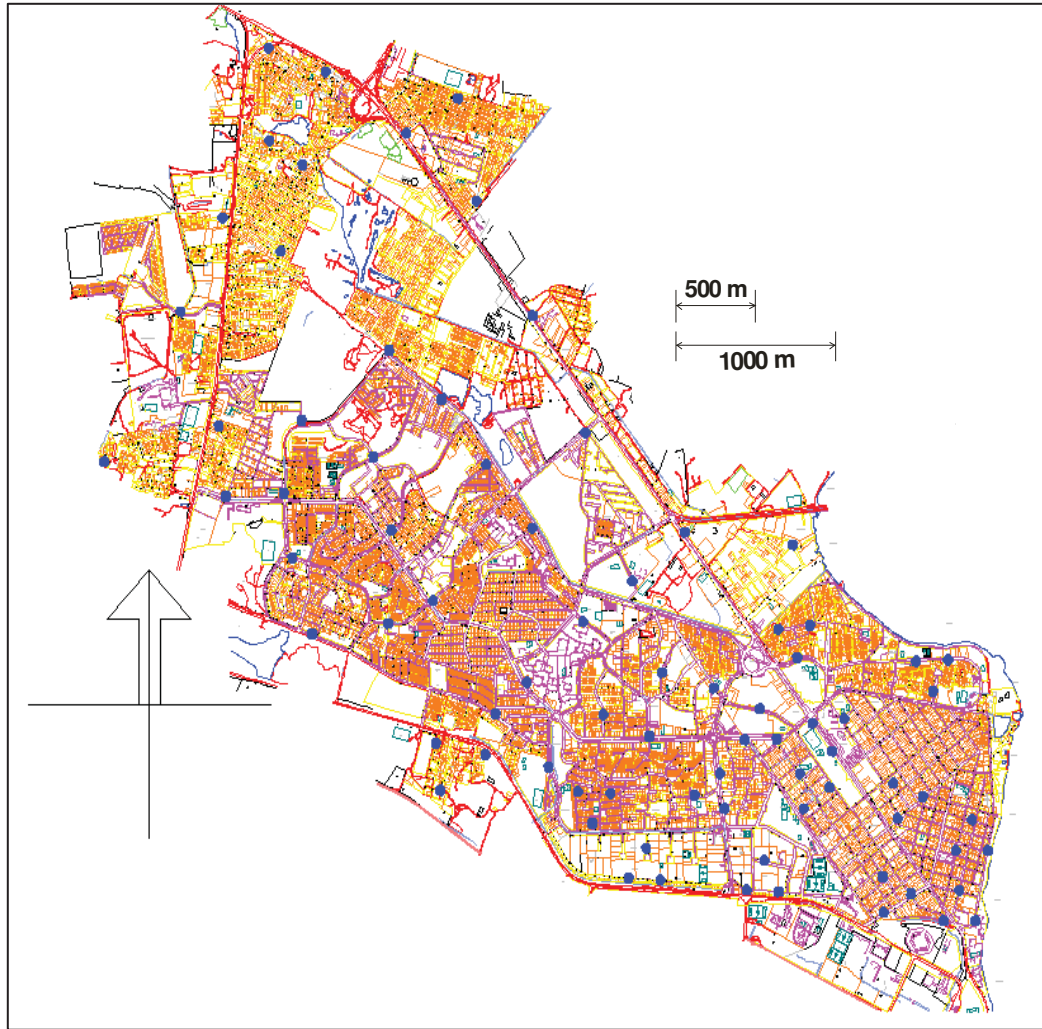


Figura 28.- Ubicación de los 83 puntos en los cuales se registraron señales de microtemores, distribuidos en el área de estudio, abarcando la mancha urbana de Lázaro Cárdenas Michoacán.

- v. *Campaña en campo.* En esta etapa el trabajo de campo consistió en el registro de los microtemores en cada uno de los puntos seleccionados en gabinete (Figura 29). En cada uno de ellos se realizó el siguiente proceso:
- Reubicación del punto de registro, en caso de que fuera requerido en función de las condiciones ambientales reales del terreno.
 - Colocación, orientación y nivelación del Sensor (Figura 30). El sensor se protegió con un trozo de tela y una cubeta para evitar que el aire o viento interfiriera en los registros de vibración del terreno.
 - Revisión y conexión de cables de comunicación.
 - Inicio de obtención de datos (el “disparo” se realizó a través de la computadora portátil).
 - Registro de microtemores en el terreno a través de un archivo digital generado por el acelerógrafo, con extensión "EVT" (ejemplo: CJ001.EVT).
 - Obtención de coordenadas en la proyección UTM, del punto donde se realizó el registro.

- g. Toma de fotografía.
 - h. Anotaciones en libreta de campo de datos de localización, croquis y las siguientes notas: Id del punto, tiempo inicial y final del registro (Horario militar o en horas : minutos), duración del registro en minutos obtenida por la diferencia de tiempo, y nombre del archivo del registro (ejemplo: C1002.EVT).
 - i. Anotación en mapas impresos del nombre designado a cada punto de medición.
 - j. Durante el proceso de registro, que tuvo una duración de 15 minutos, se vigiló el correcto funcionamiento del equipo, principalmente se tuvo precaución en que el sensor no fuera tocado ni desconectado.
 - k. Finalización automática del registro de datos o manualmente.
 - l. Desconexión del sensor para el traslado de todo el equipo al siguiente punto.
- vi. *Ordenamiento y edición de datos.* Una vez terminado el trabajo de campo se procedió a ordenar la información, ya que el acelerógrafo guarda los datos de registros en formatos binarios y les asigna un nombre con extensión EVT (el cual puede ser modificado). Este mismo nombre se marcó en los planos catastrales utilizados y en planos digitales, de tal forma que los datos recabados y notas hechas en campo no perdieran su correspondencia con los registros del acelerógrafo. También se efectuó la transformación, de código binario a código ASCII, de los archivos guardados en memoria digital, con la ayuda de un programa ejecutable llamado “KW2ASC” proporcionado por personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La finalidad del cambio de código fue para que los datos puedan ser leídos por otros programas como MATLAB, utilizado en este trabajo para el procesamiento de datos.
- vii. *Procesado de datos aplicando la técnica de Nakamura.* Para llevar a cabo este proceso se utilizó el software de programación MATLAB, en el que se empleó un programa denominado “MINAKA” diseñado por Jorge Aguirre González, Horacio Mijares y Ricardo Vázquez Rosas del Instituto de Ingeniería de la UNAM, a este programa se le adicionaron comandos y subrutinas que ayudan al manejo de los datos, principalmente en lo referente a la lectura de los archivos de registro y almacenamiento de datos en archivo de texto, construcción, edición y almacenamiento de gráficas con nombre referenciado al asignado por el acelerógrafo en el momento de registro y al número de punto correspondiente. Dicho programa permitió la realización de las siguientes actividades aplicando la técnica de Nakamura (cocientes espectrales H/V):
- Lectura y generación de graficas de las señales de microtemores (Figura 31), en función del tiempo.
 - Selección de 11 ventanas de 40.96 s, cada una para cada estación (Figura 32).
 - Suavizado de los bordes con las ventanas de Von Hann (Kulhanek, 1976) en (Vázquez-Rosas, 2002), para cada ventana.
 - Cálculo de la transformada de Fourier utilizando la FFT (Fast Fourier Transform).
 - Cálculo de la suma vectorial de los espectros de amplitud de las dos componentes espectrales horizontales (Figura 33).
 - Cálculo de los cocientes espectrales para las once ventanas. Espectro de la suma vectorial de componentes horizontales entre el espectro de la componente vertical, esto para cada ventana (Figura 33).

- Cálculo del promedio de los once cocientes espectrales y de la desviación estándar (Figura 34).
- Gráfica del promedio resultante (Figura 34).

Cabe mencionar que lo anterior se realizó para los registros de cada uno de los 83 puntos de medición, y que la selección de las once ventanas se realizó de tres formas diferentes (Figura 32):

- Primera, seleccionando once ventanas continuas desde el inicio de los registros.
- Segunda, seleccionando once ventanas continuas al final de los registros.
- Tercera, seleccionando once ventanas de acuerdo a características en las gráficas de los microtemores, de tal manera que se utilizaron señales con menos discontinuidades o donde el registro fue más estable y con menos ruido.

De tal forma que en la mayoría de los puntos de registro se obtuvieron tres cocientes espectrales de H/V.

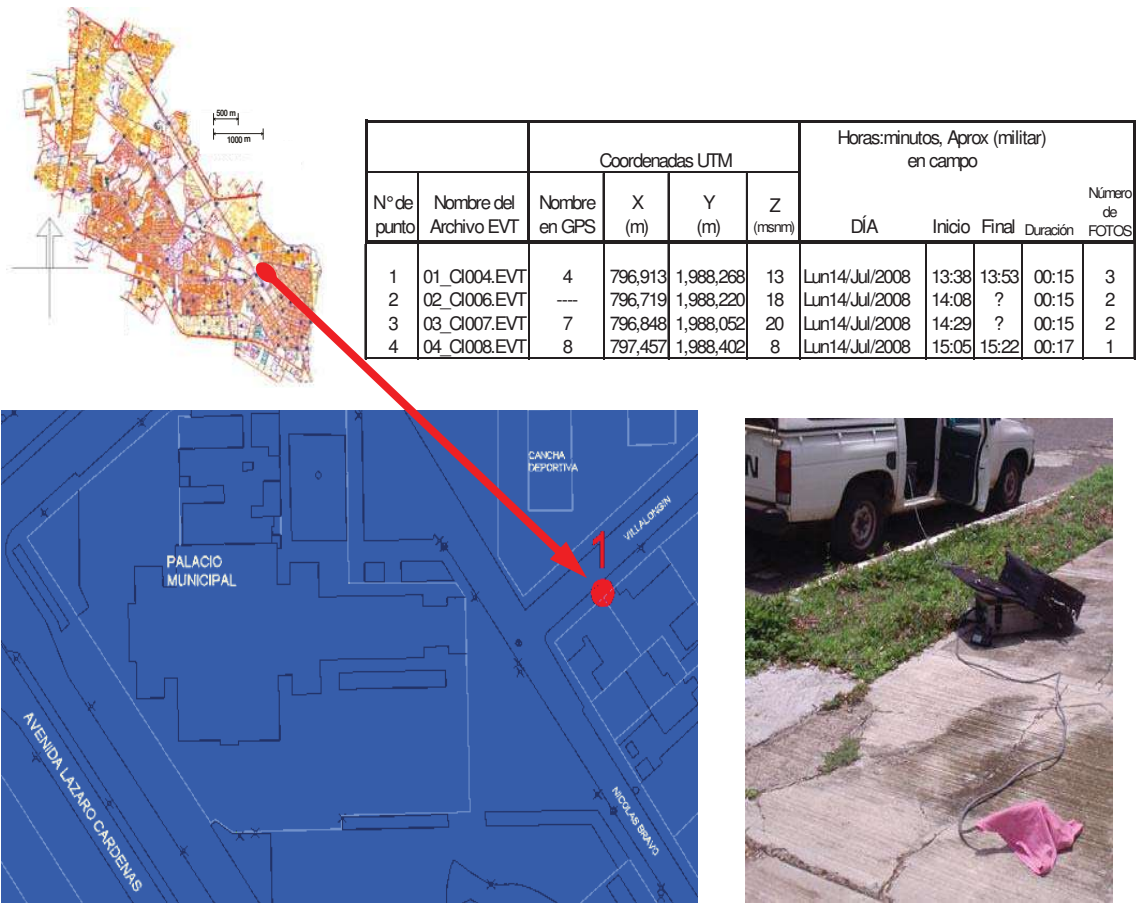


Figura 29.- Identificación de los puntos de medición, colocación de sensor y registro en campo; para la obtención de señales de microtemores. En la figura inferior derecha se puede observar el equipo utilizado.



Figura 30.- Colocación del sensor el cual tiene grabado un eje de coordenadas que se orienta hacia el norte el correspondiente al eje X, a demás se nivela por medio de tres tornillos ajustadores basándose en el nivel de burbuja integrado.



Figura 31.- Muestra de la lectura de datos de los microtremores para el punto número 01 de las tres componentes: vertical, Norte-Sur y Este-Oeste, con su respectiva gráfica, generada en Matlab: señal vertical (gráfica superior color verde), señal N-S (gráfica central color rojo), y señal E-W (gráfica inferior color azul). En el eje de las absisas se indica el número de muestras (100 por cada segundo de grabación), y en el eje de las ordenadas se representa el número de cuentas.

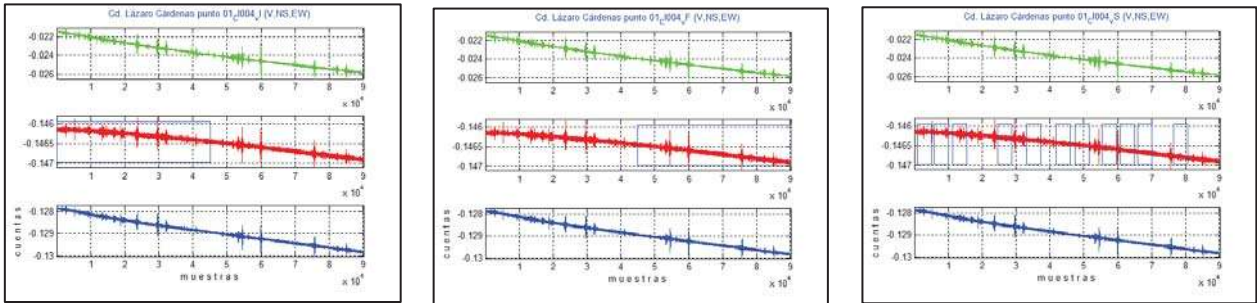


Figura 32.- Tres formas diferentes en que se determinaron las once ventanas en cada ejecución del programa MINAKA para determinar los cocientes espectrales de amplitudes de Fourier (H/V), la frecuencia dominante del terreno y su respectivo período. En la gráficas se muestra con rectángulo azul las once ventanas seleccionadas, aun que solo se marcaron para la componente N-S también corresponden con el mismo rango de muestras (eje horizontal) para las otras dos componentes (vertical y E-W).

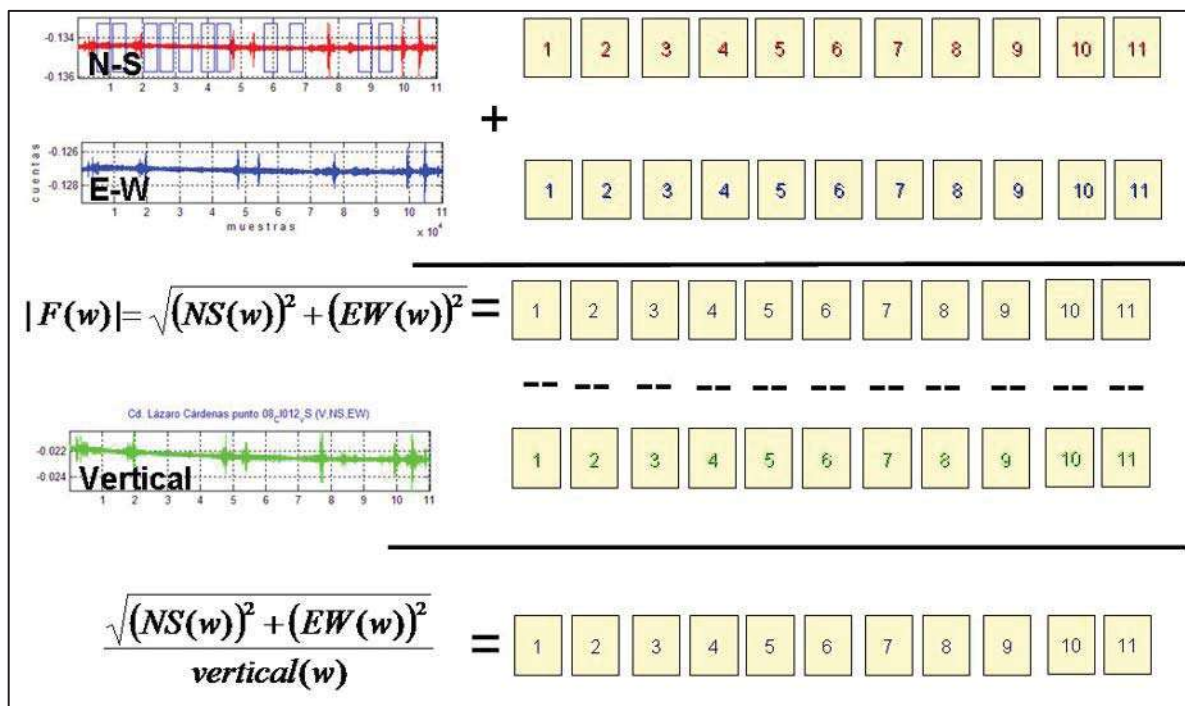


Figura 33.- Ejemplo de la obtención de los cocientes espectrales de amplitudes Fourier (H/V). Cada rectángulo de las componentes N-S, E-W y vertical, representan el espectro de Fourier de cada ventana. Primero se suman vectorialmente cada una de las ventanas de las componentes horizontales (N-S y E-W) en función de la frecuencia, obteniendo la resultante horizontal de cada ventana, éstas son divididas por su correspondiente ventana vertical, también en función de la frecuencia; obteniendo así once ventanas de cocientes espectrales (H/V).

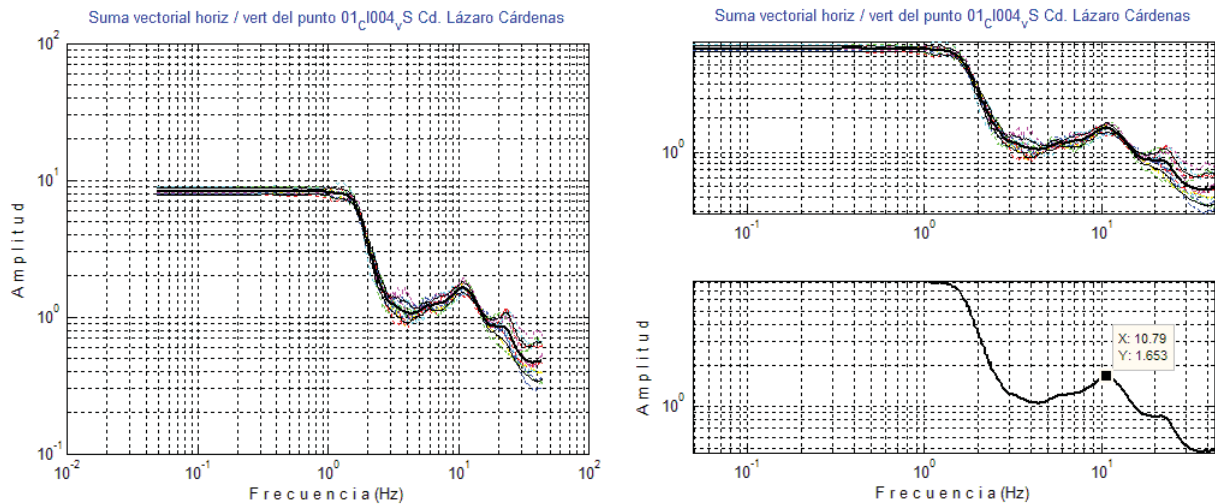


Figura 34.- Gráficas de los cocientes espectrales de amplitudes Fourier. Figura de lado izquierdo contiene los once cocientes (H/V), cada uno en línea de color, a demás con línea gruesa y negra se representa el promedio de las once, también con línea negra el promedio más la desviación estándar y el promedio menos la desviación estándar; ambos ejes están en escala logarítmica para su mejor apreciación, el eje horizontal representa el valor de la frecuencia (Hz) y el eje vertical representa las amplitudes (adimensionales). La figura de la derecha contiene dos gráficas: la superior es la misma que la del lado izquierdo, solamente que con los ejes ajustados al espacio ocupado por las gráficas, en la parte inferior se muestra únicamente la línea que representa el promedio de los once cocientes (H/V) en la cual se identificó el valor de la máxima amplitud y a su correspondiente frecuencia (frecuencia dominante del terreno). Se etiquetaron en ese punto los valores: $x=10.79$ (frecuencia), $y: 1.653$ (amplitud máxima sobresaliente).

viii. *Análisis y obtención de periodos.* Para obtener el valor de frecuencia dominante del terreno y su respectivo periodo en cada lugar de registro, fue necesario analizar las gráficas resultantes de los cocientes espectrales de Fourier (que contienen los once cocientes, su promedio, el promedio más la desviación estándar y el promedio menos la desviación estándar). Con base en lo anterior se generó una gráfica adicional en la que se muestra solamente el promedio de los cocientes espectrales (H/V). A partir de ésta última gráfica, que permite una mejor visualización del valor máximo de amplitud, y con la ayuda del programa MATLAB, se determinó el valor de la frecuencia correspondiente a la amplitud máxima, es decir la frecuencia dominante del terreno (Figura 35 derecha). Lo anterior dentro de la región del gráfico, donde se observan variaciones de amplificaciones importantes en la amplitud. Todo lo anterior se realizó utilizando las tres gráficas de los cocientes (H/V) de las cuales se determinó el período dominante y se realizó una comparación entre ellos, concluyendo que no existe mucha diferencia entre sus valores.

Existen casos en donde el gráfico de los cocientes espectrales presenta dos o más picos con valores similares de amplitud. Aun en estos casos se debe de elegir el de mayor amplitud, para ello es necesario realizar su evaluación de manera minuciosa.

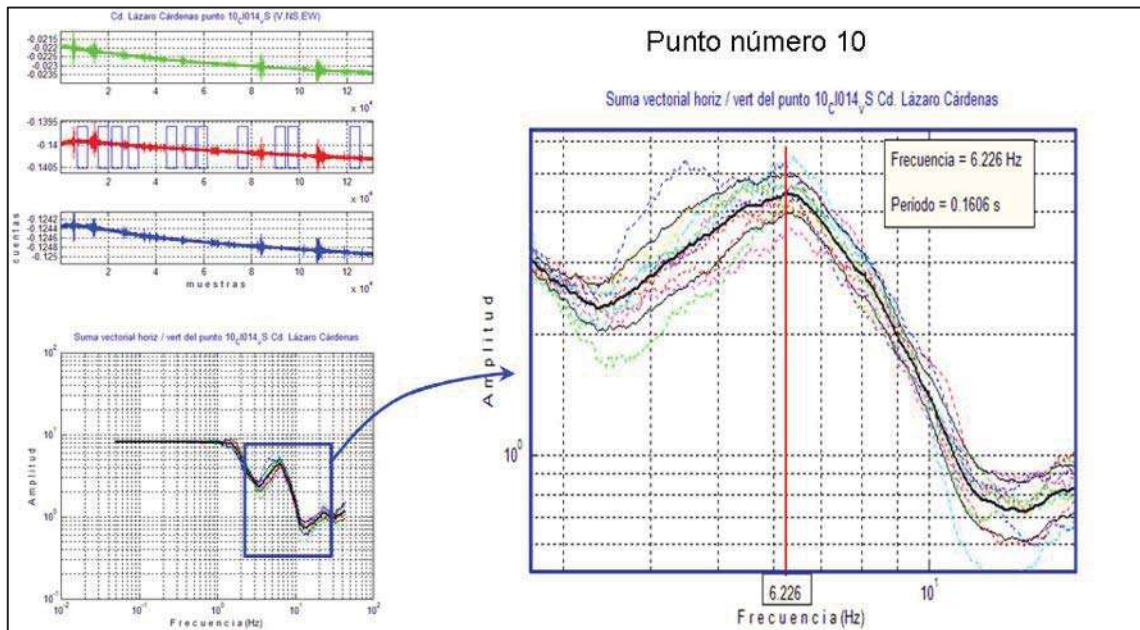


Figura 35.- Determinación de la frecuencia dominante y su respectivo período a partir de los cocientes espectrales de amplitudes Fourier (H/V), se ubica donde la amplificación de la amplitud es notoria, en este caso solamente existe una y de su valor máximo se obtiene la frecuencia. Frecuencia = 6.226 Hz, Período=(1/Frecuencia)=0.1606 s

ix. *Mapa de isoperiodos.* Para la realización del mapa de isoperiodos, se ordenaron los datos de periodos correspondientes a las frecuencias dominantes del terreno, en una tabla con tres columnas y 83 renglones un renglón por cada punto medido. La primera y segunda columnas contenían valores de las coordenadas X y Y, respectivamente; y la tercera columna poseía el valor de periodo en segundos. A partir de esta tabla y con ayuda del programa Surfer (versión 8), se obtuvo el modelo digital de periodos aplicando el método de interpolación Kriging.

IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Como resultado del procesamiento de los registros de microtemores de los 83 puntos distribuidos dentro de la zona urbana de Lázaro Cárdenas, se obtuvieron para cada uno, los cocientes espectrales de amplitudes de Fourier (en la figura 34 se muestra el del punto número 01) y su respectivo período dominante (en la figura 35 se observa el del punto 10) así como un mapa de isoperiodos.

Se obtuvieron tres cocientes espectrales (H/V), uno de cada forma diferente de la selección de rangos de ventanas de señales de los microtemores, para cada cociente (H/V) se determinó el valores de período dominante, se realizó una comparación entre los tres y finalmente se decidió por uno representativo, por ejemplo para el cociente espectral (H/V) del punto número 12 mostrado en la figura 36, se obtuvieron periodos de 0.1941 s, 0.1988 s y 0.1950 s, utilizando este último para el mapa de isoperiodos. El mismo criterio se utilizó para los demás puntos en los que se determino poca diferencia en la comparación de valores por lo que en los resultados solo se muestra una gráfica de (H/V) de cada punto.

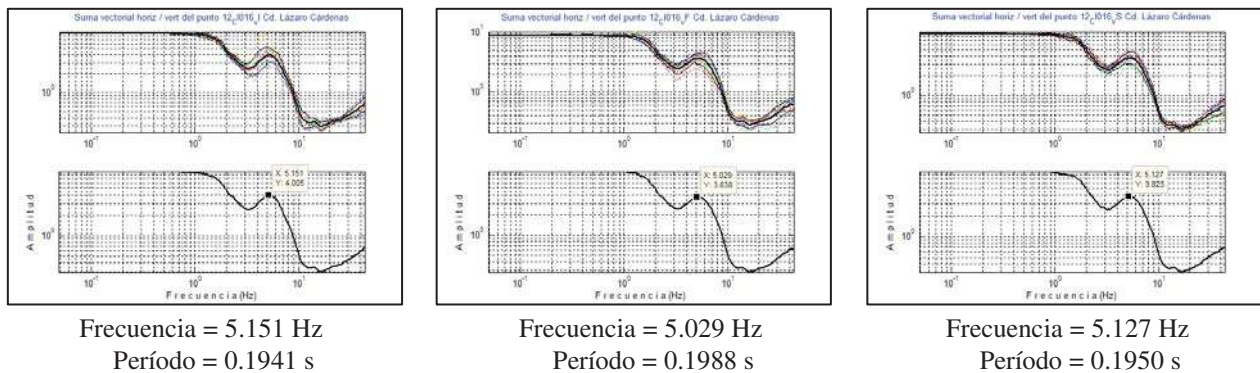


Figura 36.- Gráfico de los tres cocientes espectrales de amplitudes (H/V) con valores de frecuencia y período dominantes, correspondientes al punto número 12, el eje horizontal representa las frecuencias en Hz., el eje vertical representa las amplitudes, adimensionales, ambos ejes en escala logarítmica. Cada gráfica tiene un título en el que se indica que es el cociente de los espectros de la suma vectorial de componentes horizontales entre la componente vertical, también indica al número de punto al que corresponde; "I016" indica que con ese nombre más la extensión EVT es el nombre con el que se almacenó el archivo de datos de los registros de microtemores; vI, indica que es correspondiente a la selección de las ventanas iniciales en el registro; vF, indica que es correspondiente a la selección de las ventanas finales en el registro; vS, indica que es correspondiente a la selección de las ventanas elegidas manualmente y decidiendo rangos más apropiados en el registro; finalmente indica que son correspondientes a la ciudad de Lázaro cárdenas.

Se obtuvieron tres tipos característicos de gráficas de cocientes espectrales de amplitudes de Fourier (H/V):

- 1.- La mayoría contienen una amplitud característica o notoria como máxima ante las demás (Figuras 34, 35 y 36), de las que es evidente que el período dominante corresponde a dicha amplitud máxima.
- 2.- En algunas gráficas se observan dos o tres amplificaciones con tendencia a formar una curva de máximos, pero una de ellas es mayor por lo que se utilizó para la determinación del período dominante (Figura 37).
- 3.- Seis gráficas de cocientes (H/V) mostraron tendencia rara en la que desciende hasta un mínimo y después asciende sin diferenciarse algún máximo de amplitud por lo que no se

determinó valor de período y tampoco se tomaron en cuenta para la creación del mapa de isoperiodos, estas gráficas corresponden a los puntos 42, 48, 61, 62, 63 y 79 como un ejemplo se muestra la (figura 38). En estos casos puede ser que en la colocación del equipo o en la lectura de los registros de vibración ambiental hubo algún inconveniente, también existe la posibilidad de que en los lugares correspondientes el terreno en el subsuelo sea complejo y se comporte como irregular en el que no se pueda definir fácilmente el período de vibrar y habría que explorar y auxiliarse de información acerca del tipo de suelo o de la geología existente.

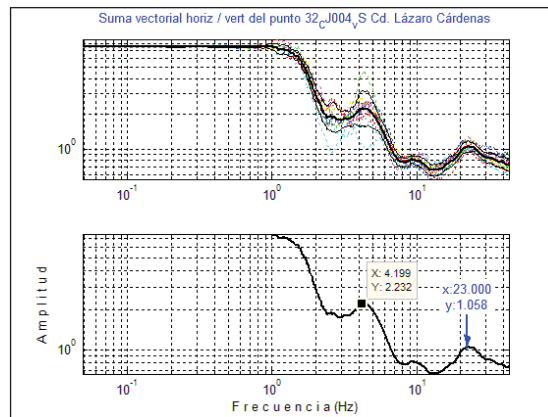


Figura 37.- Gráfico de cocientes espectrales de amplitudes (H/V) correspondiente al punto 32 en el que se distinguen dos amplitudes características de las cuales una es mayor, que es la que se tomó en cuenta, aunque también puede ser que en el lugar correspondiente al terreno exista resonancia con los dos periodos correspondientes a las frecuencias notorias.

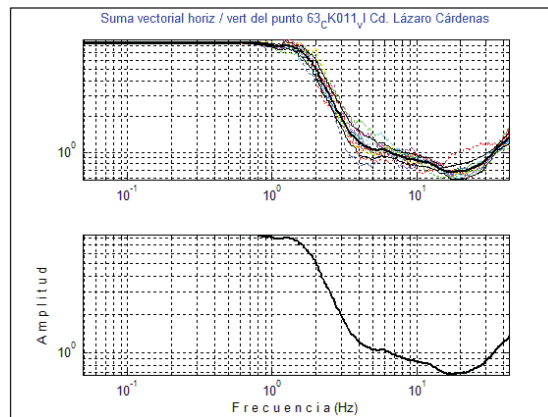


Figura 38.- Gráfico de cocientes espectrales de amplitudes (H/V) del punto 63 que representa comportamiento parecido para el de los puntos 42, 48, 61, 62, y 79 en los cuales no se distingue una amplitud que pueda definir la frecuencia dominante del terreno.

Las gráficas de cocientes espectrales correspondientes a los 83 puntos de registro en el área de estudio se muestran en el anexo II, en el título de cada una indica el número de punto al que corresponden.

Tomando en cuenta el proceso de datos, sus resultados y análisis así como criterios ya mencionados de determinarón los períodos dominantes, los cuales se enlistan en una tabla (Tabla 6) indicando su frecuencia correspondiente, al punto al que pertenecen y sus respectivas coordenadas UTM. En dicha tabla no se incluyen los puntos 42, 48, 61, 62, 63 y 79

Tabla 6.- Periodos dominantes del terreno indicando el punto al que corresponden, sus coordenadas UTM y la frecuencia.

Punto	Coordenada X (m.)	Coordenada Y (m.)	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Punto	Coordenada X (m.)	Coordenada Y (m.)	Frecuencia (Hz)	Período (s)
1	796913	1988268	10.8600	0.0921	40	795066	1988038	4.2970	0.2327
2	796718	1988219	3.4180	0.2926	41	794728	1988286	7.1780	0.1393
3	796848	1988052	10.7400	0.0931	43	794633	1988063	11.1100	0.0900
4	797457	1988402	9.4480	0.1058	44	794347	1988153	7.8610	0.1272
5	797751	1988526	4.4680	0.2238	45	796556	1989248	31.5400	0.0317
6	797338	1988610	7.7880	0.1284	46	795892	1989336	4.6140	0.2167
7	796684	1988803	5.6680	0.1764	47	795576	1989053	11.8700	0.0842
8	796470	1988789	5.4440	0.1837	49	794921	1988407	11.4500	0.0873
9	796610	1988606	28.7800	0.0347	50	795397	1988287	15.6000	0.0641
10	797718	1987116	6.2260	0.1606	51	795676	1988178	8.2760	0.1208
11	797631	1987274	5.5660	0.1797	52	795759	1988500	31.5200	0.0317
12	797524	1987126	5.1270	0.1950	53	796086	1988445	6.5190	0.1534
13	797768	1987512	7.1530	0.1398	54	793656	1991925	15.8200	0.0632
14	797604	1987523	5.3470	0.1870	55	793295	1992088	8.8870	0.1125
15	797715	1987679	13.3100	0.0751	56	793314	1991527	11.5500	0.0866
16	797443	1987825	10.5700	0.0946	57	792750	1990562	6.6650	0.1500
17	797215	1987879	6.0790	0.1645	58	793018	1991100	41.9400	0.0238
18	797231	1987677	9.3990	0.1064	59	793346	1990918	10.6700	0.0937
19	797151	1987372	6.9580	0.1437	60	793518	1991401	6.4940	0.1540
20	797160	1987176	5.9080	0.1693	64	793196	1989529	16.4300	0.0609
21	797337	1987254	5.9810	0.1672	65	793516	1989911	15.7700	0.0634
22	796652	1987765	4.1260	0.2424	66	794041	1990313	22.0700	0.0453
23	796803	1987883	5.9080	0.1693	67	794389	1990969	6.7380	0.1484
24	796626	1987951	8.8870	0.1125	68	794046	1991005	9.2530	0.1081
25	796398	1987458	5.6150	0.1781	69	794163	1990626	3.1980	0.3127
26	796514	1987257	6.6160	0.1511	70	794384	1990066	3.3200	0.3012
27	796268	1987307	2.8810	0.3471	71	794667	1989698	29.0800	0.0344
28	796141	1987782	5.8110	0.1721	72	794971	1989341	19.6800	0.0508
29	796115	1988002	6.7140	0.1489	73	795282	1989879	8.7890	0.1138
30	795934	1987833	8.2030	0.1219	74	794322	1988942	12.6000	0.0794
31	796274	1988144	6.4700	0.1546	75	794953	1990534	6.8120	0.1468
32	796515	1988137	4.1990	0.2382	76	794611	1991289	10.3800	0.0963
33	796317	1988326	6.4700	0.1546	77	794441	1991789	3.8820	0.2576
34	795666	1987530	8.5940	0.1164	78	794162	1991577	4.0530	0.2467
35	795729	1987349	6.9340	0.1442	80	794071	1989328	30.8100	0.0325
36	795422	1987369	8.9840	0.1113	81	793481	1989158	12.7000	0.0787
37	795323	1987670	7.7880	0.1284	82	793597	1988726	8.3500	0.1198
38	795449	1987831	8.4720	0.1180	83	794070	1988801	12.5000	0.0800
39	795257	1987839	6.1280	0.1632					

El mapa de isoperiodos (Figuras 39 y 40) se realizó cubriendo una zona con dimensiones necesarias para mostrar el área de estudio en el que los valores en los ejes de las abscisas y ordenadas se tienen unidades de metros, y los valores marcados para las isolíneas representa el valor de periodos en unidades de segundos. Cada punto marcado representa los lugares donde se registraron los microtremores; también se indica el nombre de algunos lugares de la ciudad que sirvan como referencia.

Se tienen curvas de isoperiodos entre valores de 0.023 segundos y 0.3471 segundos, de los cuales se distinguen zonas con periodos menores a 0.10 segundos (Figura 38) y se observa que predominan los periodos menores a 0.20 segundos y que tienen solamente cuatro zonas en las que se distinguen mayores períodos, como en el Deportivo al Sur de la ciudad, cerca de la Escuela secundaria Técnica # 12, en el fraccionamiento Tinoco Rubí y al norte de la ciudad.

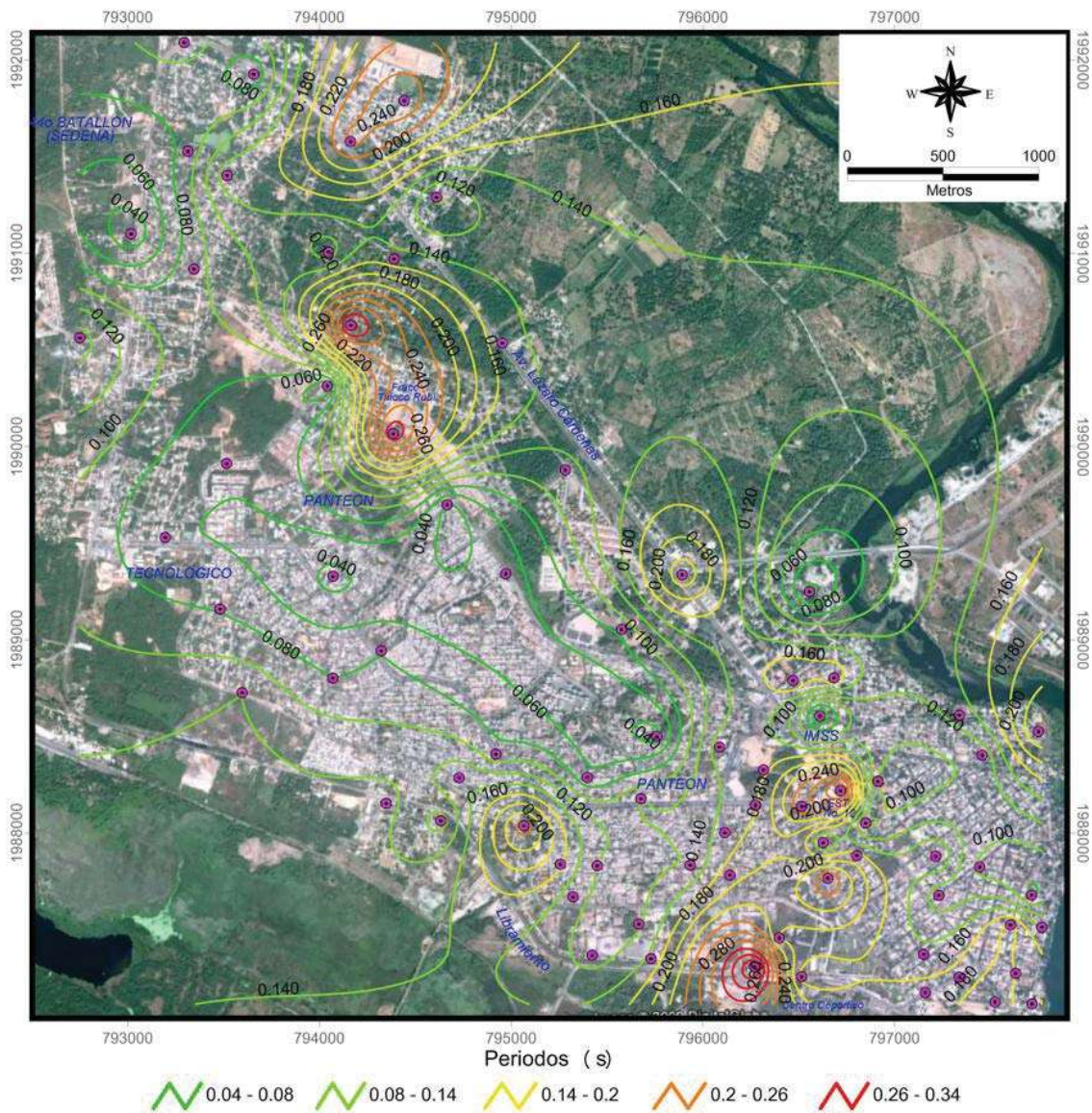


Figura 39.- Mapa de isoperiodos para la zona urbana de Lázaro Cárdenas Michoacán; ejes horizontal y vertical en metros, valores de isolíneas en segundos; los puntos representan los lugares de registro.

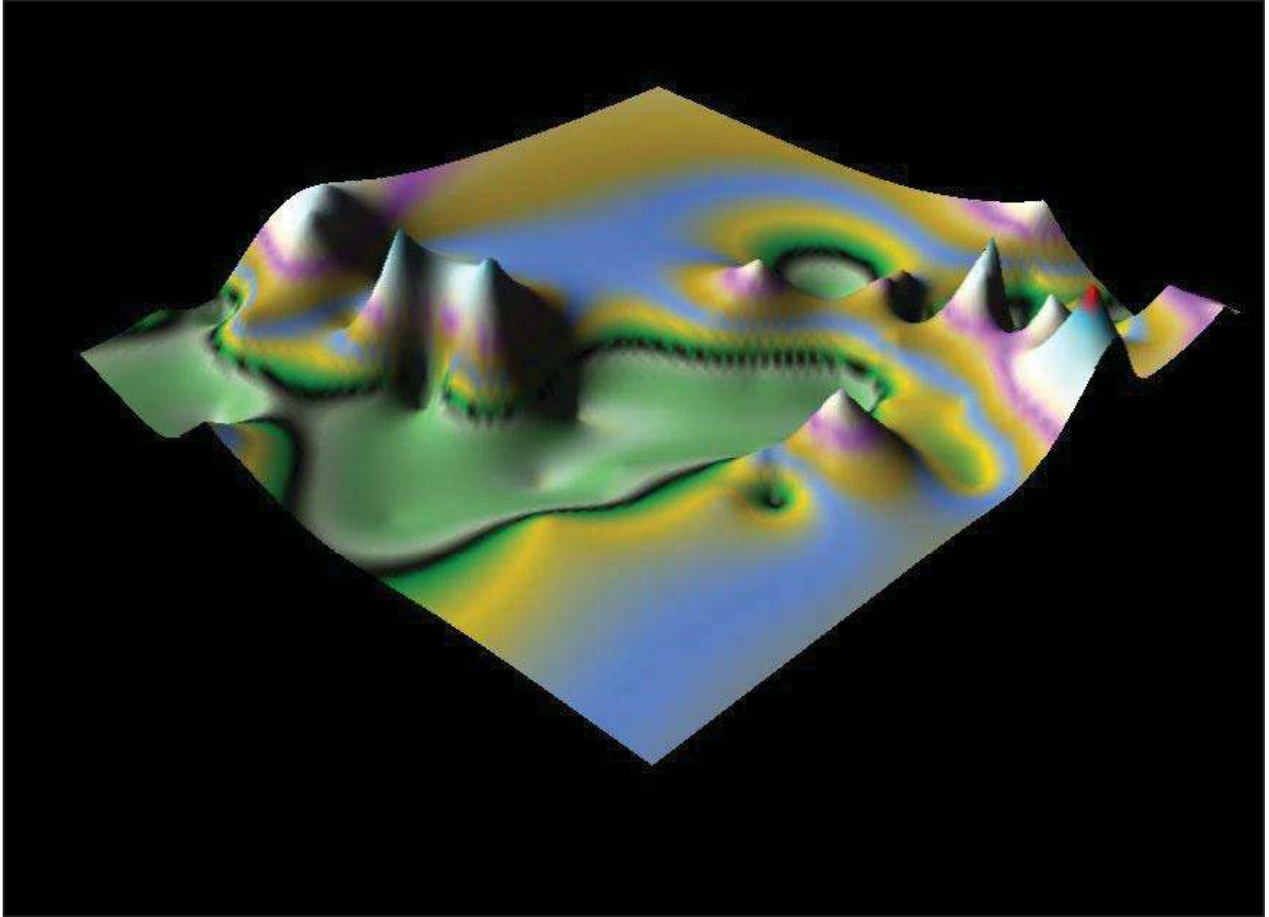


Figura 40.- Mapa tridimensional de los periodos dominantes de la ciudad, la línea negra continua corresponde a la curva de isoperiodos con valor de 0.10 segundos, la zonas que circula contienen periodos menores a 0.10 s.

Discusión de resultados

Se obtuvieron registros de vibración ambiental (microtremores) en 83 puntos individuales, los cuales se ubicaron en la zona urbana de la ciudad de Lázaro Cárdenas. Los datos de registros se analizaron y procesaron por medios computacionales. Aplicando el método de Nakamura (1989), se obtuvo la relación H/V , con la cual se determinó la frecuencia dominante del terreno para cada lugar de registro, y su correspondiente valor de periodo (período= $1 / \text{frecuencia}$).

De los 83 registros se obtuvieron períodos con valores que van de los 0.0238 s hasta los 0.3174 s. De acuerdo con el criterio establecido para el Distrito Federal, en donde el terreno se clasifica en función del periodo como firme ($<0.4s$), intermedio (0.4-1.0 s) y blando ($>1.0s$) (Jara, *et al*, 1993); el terreno de Lázaro Cárdenas es considerado como un terreno firme.

No obstante lo anterior, en la ciudad de Lázaro Cárdenas se distinguen tres clases de terreno: terrenos muy firmes ($<0.1s$), terrenos medianamente firmes ($0.1 - 0.2s$), y terrenos poco firmes ($>0.2s$). La primera clase domina los sectores central y occidental de la mancha urbana de la ciudad, es decir las zonas donde se localiza el Tecnológico y el 44° Batallón de Infantería. La segunda clase predomina principalmente en el sector sureste de la ciudad, en la proximidad con la zona de la industria siderúrgica Acerlor Mittal, antes Sicartsa, y cauce del río Balsas. Y la tercera clase se manifiesta en cinco zonas particulares: Palacio del H. Ayuntamiento, norte del centro deportivo Sicartsa, fraccionamiento Tinoco Rubí, y norte de la mancha urbana.

Con base en las frecuencias naturales y periodos fundamentales de edificios, adoptada por la UNESCO (Tabla 7), en la zonas clasificada como terreno “muy firme” es posible la construcción de edificios de cualquier nivel; en la zona “medianamente firme” no se recomienda la construcción de edificios de un nivel, es decir este terreno es apropiado para edificaciones de dos o más niveles; y finalmente en la zona “poco firme” no se recomienda la construcción de edificios de más de un nivel, o sea, es apropiado para construcciones de un solo nivel.

No obstante lo anterior, si la estructura de la edificación se diseña para que presente frecuencias naturales diferentes a las del terreno, reportadas en este trabajo, la obra civil podrá realizarse en cualquiera de las zonas antes mencionadas.

Tabla 7.- Ejemplos de frecuencias y periodos para edificios (modificado de UNESCO RAPCA)

Tipo de estructura	Frecuencia natural (Hz)	Periodo fundamental (Seg.)
Un nivel	10	0.1
3-4 niveles	2	0.5
Edificios altos	0.5 – 1.0	2.0-1.0
Rascacielos	0.17	5.8

X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se registraron períodos con valores desde 0.023 segundos hasta 0.3471 segundos.

Zonas hacia el Sur, cercanas a la costa y al río Balsas tienen menor altitud, mayor cantidad de arcillas y períodos de movimiento entre 0.03 segundos y 0.20 segundos.

Zonas hacia el Norte, tienen existencia de material conglomerado a poca profundidad y períodos de 0.063 s, 0.088 s, 0.100 s, indica que puede dañar construcciones de un nivel.

En zonas donde aumenta el valor del período dominante del terreno coincide con lugares de loma.

Se diferenciaron tres zonas características de acuerdo al período del terreno:

- 1.- Zona en la que sus períodos son menores a 0.10 segundos.
- 2.- Zonas en las que los períodos son menores a 0.20 segundos.
- 2.- Zonas en las que los períodos son menores a 0.3471 segundos.

De acuerdo a los períodos dominantes del terreno en la zona urbana de la ciudad se determina que ante algún evento sísmico fuerte, existe mayor posibilidad de daño en las construcciones entre 1 nivel, 2 niveles y 3 niveles de altura (aproximadamente 3 m de altura, 6 m y 9 m, respectivamente).

Los registros de vibración ambiental que contienen algunos picos o representaciones de algunos movimientos que alteren la estabilidad de la señal, éstos no afectan para la generación de espectros de H/V, ni para la obtención de frecuencia dominante.

En los resultados de este estudio no hay mucha diferencia entre los valores obtenidos de período dominante de terreno utilizando las tres formas diferentes de elección de rangos (ventanas).

La microzonificación y el método de Nakamura son relativamente fáciles de usar, prácticos y sin contaminación ambiental y sobre todo seguros ya que no hay que esperar a que sucedan sismos fuertes o desastrosos.

La microzonificación contribuye a determinar efectos de sitio sin tener que esperar sismos y contribuye para posibles reglamentos locales.

RECOMENDACIONES

El trabajo realizado y los resultados se pueden utilizar como un parámetro más que permita evaluar las construcciones existentes y diseñar con cierto grado de seguridad las construcciones nuevas (tomando en cuenta el efecto de resonancia).

Se tienen estudios, resultados y bases para la continuación de estudios relacionados ya sean para complementar los existentes y los propuestos por estos trabajos para dar pauta a mejores conocimientos respecto al comportamiento de los terrenos ante posibles eventos sísmicos.

Generar mayor criterio con los datos obtenidos y que puedan ser tomados en cuenta para complementar la normatividad referente a los criterios de construcción y poder generar espectros de diseño sísmico propios que puedan influir en mejoras del lugar.

Motivar al mayor interés por estudios de peligro y riesgo sísmico.

Recomendaciones respecto a las construcciones existentes.

Recomendaciones respecto a las construcciones futuras.

Recomendaciones respecto a terrenos con diferentes períodos dominantes del terreno.

Recomendaciones respecto a planificación territorial.

Se recomienda que para una mejor aproximación de valores de períodos dominantes del terreno, se realice a los registros de este trabajo una corrección por línea base y probablemente algún filtrado para enfatizar más los resultados eligiendo algún rango de frecuencias.

También es recomendable que para trabajos de este tipo los datos adquiridos sean procesados por personas diferentes y por diferentes métodos para la corroboración de resultados.

Es recomendable que para el estudio de alguna obra en particular se efectúen mediciones con mayor número de puntos cercanos y alrededor del área de estudio con la finalidad de que los resultados sean mucho más locales al área de interés.

También es recomendable que para mayor seguridad se determine el período natural de vibración de las estructuras de interés por algún medio ya sea teórico o con instrumentación directa de la estructura y así poder comparar con el período dominante del terreno.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Bardales Zenón, Alva-Hurtado Jorge E., 1991. Microzonificación sísmica de la ciudad de Arequipa, Ponencia Presentada al VI Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima, Perú, 15 pp.
- Aguirre-González J., Mijares-Arellano H., Briones-Ruiz E., Mares-Flores E., 2003. Aplicación del Método SPAC para Estudios Geotécnicos caso Texcoco. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guanajuato-León, México, noviembre 2003.
- Alonso-G. José L., 1993. Microzonificación Sísmica de Áreas Urbanas ¿Qué es y para qué sirve?, Asociación Venezolana de Ingeniería Estructural. Venezuela, 64 pp.
- Bard, P., 1998. Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation?. The effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikuda, Kudo, Okada & Sasatani (eds), Balquema, Rotterdam, The Netherlands, 1251-1279 pp.
- Bernal I. y Lermo J., 2005. Zonificación sísmica del estado de Tlaxcala, México. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, artículo III-01, 8 pp.
- CENAPRED, (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 1997. Sismos, Fascículo No. 2 CENAPRED, México, 25 pp.
- Chávez-Hernández J, (2006) “Estudio de las características mecánicas de los suelos de la ciudad de Pátzcuaro Michoacán, sus relaciones con la respuesta a un evento sísmico y de microzonificación sísmica” Tesis de maestría. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas UMSNH Morelia Mich.
- Flores-Estrella, H., Aguirre-González J., 2003. SPAC: An alternative method to estimate earthquake site effects in Mexico City, Geofísica Internacional, Vol. 42, num. 2, 227-236 pp.
- García Acosta V. (coordinadora),(1992). Estudios Históricos Sobre Desastres Naturales en México. Centro de investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. México.76p.
- Garduño M .V. H. y Torres Escamilla J.R, 1996. Revisión Histórica de la Sismicidad en Michoacán. México. Ciencia Nicolaita. p. 57-81.
- Garduño M V H, Arreygue RE, Chiesa S, Israde Alcantara I, Rodríguez T G M, y Ayala G M (1998). “Las Fallas geológicas y sísmicas de la ciudad de Morelia y su influencia en la amplificación de su territorio”. Ingeniería civil, Vol. 1, No5. p. 4-12.
- Garduño M. V. H., Corona-Chávez P., Israde Alcantara., Menella L., Arreygue, E., Bigiogero B. y Chiesa S., (1999). Carta Geológica de Michoacán.

- González-Raynal Bertha E. y Pérez-Lara Luis D., 2000. Utilización de los mapas de microzonificación sísmica en el planeamiento urbano y la reducción del riesgo sísmico, Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Departamento de Sismología de Ciudad de la Habana. 12 pp.
- González-Bertha E., Serrano Manuel, Pérez Luis D. y Pacheco S. Elier, 2002. Zonificación sísmica detallada del municipio de Mariel y microzonificación sísmica del núcleo urbano, 15 pp.
- INEGI, Información proporcionada en las oficinas de la ciudad de Morelia Michoacán, (2007).
- INEGI, censo de 2000
- INEGI, (2005), Cuaderno estadístico Municipal para la ciudad de Lázaro Cárdenas Michoacán, edición diciembre del 2005, 187 pp.
- Jara J. M. y A. R. Sánchez (2001). "Leyes de atenuación para el estado de Michoacán". Revista de la coordinación científica de UMNSH. No. 27.
- Jara-Guerrero J. M., Jara Díaz M. y Hernández Barrios H., 2008, Riesgo sísmico en zonas urbanas, IV Curso Internacional de Geomecánica Computacional, Abril del 2008 en Morelia Michoacán, México, 30 pp.
- Kulhánek, O., 1976, Introduction to digital filtering in Geophysics. Elsevier Scientific Publishing Company, The Netherlands, 168 pp.
- Lermo-Samaniego J., Garduño-Monroy V. H., Arreygue-Rocha E., Israde-Alcántara I. y Rodríguez-Torres G., 1999. Microzonificación sísmica preliminar de la ciudad de Morelia, Michoacán, México, Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 137-145 pp.
- Martínez B. A. y C. C. Javier, (1991). Carta sísmica del estado de Michoacán. Instituto de Ingeniería, UNAM, 61 pp.
- Martínez R. Guillermo, (2000), Peligro sísmico y espectros de diseño para la ciudad de Uruapan, Michoacán. Tesis de maestría. División de postgrado de la facultad de ingeniería civil de la UMSNH, Morelia, Michoacán. 115 pp.
- Nakamura, Y., (1989), A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface. QR of R.T. r., 30-1
- Nava A., 1998. Terremotos, Fondo de Cultura Económica, México, 158 pp.
- Pérez-Rocha E., Vieitez-Utesa L., Flores-Cruz F. y Zárate-Vázquez M., 1996. Predicción de Intensidades Sísmicas para el Área Metropolitana del Valle de México, Cuaderno No. 13, Cuadernos FICA, México, 54 pp.

- Reinoso E., 2000. Estudios para la Microzonificación. Memorias del VI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica y II Reunión sobre la Enseñanza de la Ingeniería Sísmica en México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A. C.
- Sánchez-Garcilazo Verónica, 2000. Estudio de la Macrosismicidad del Estado de Michoacán, Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, UMSNH, Morelia, México, 133 pp.
- Servicio Sismológico Nacional, (SSN), 2008, Catálogo de sismos fuertes, página WEB <http://www.ssn.unam.mx/>
- Servicio Sismológico Nacional, (SSN), 2009, Catálogo de sismos fuertes, página WEB <http://www.ssn.unam.mx/>
- Sauter F. F., 1989. Fundamentos de Ingeniería Sísmica, Tomo I, Introducción a la Sismología. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Costa Rica, 271 pp.
- Singh S.K., Rodríguez M., and Espindola J. M., 1984. "A Catalog Of Shallow Earthquakes of México From 1900 to 1981. Bulletin Of Sismological Society of América, vol. 74, No. 1. pp. 267-279.
- Tarback, Edgard J. y Lutgens Frederick K. (2000), "Ciencias de la Tierra, una introducción a la Geología física, primera edición, editorial Prentice Hall Iberia, S.R.L. traducido de: Earth. An introduction to physical Geology, 6th. Ed. 1999, misma editorial. 616 pp.
- Torres-Morales G. F., 1995. Importancia de la Microzonificación sísmica de las principales ciudades del Estado de Veracruz. (Xalapa, Veracruz). Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana, 9 pp.
- UNESCO RAPCA,
- Vázquez Rosas R, (2002), Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan Michoacán. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería UMSNH Morelia Mich.
- Vázquez Rosas R, (2003), "Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan Michoacán". Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Guanajuato. Noviembre. Artículo II-8 (en extenso).
- Vázquez Rosas R, (2007), "Estudio de microtremores aplicando el método SPAC para las ciudades de Uruapan Michoacán y Monterrey Nuevo León". Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.
- Vázquez R. Ricardo, Aguirre González Jorge, Garduño M Víctor H, Mijares A. Horacio. (2005) "Estudio de microtremores para la ciudad de Uruapan Michocán aplicando el método SPAC" Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México D.F. Septiembre (en extenso).

Vázquez R. Ricardo, Aguirre González Jorge, Garduño M Víctor H, Mijares A. Horacio. (2005) “Propuesta de microzonificación sísmica para de la ciudad de Zamora Michoacán” Memorias del V Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México D.F. Septiembre 2005.

Wikipedia, la enciclopedia libre en Internet.

http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_sismolog%C3%ADa

ANEXO I

Escala de Mercalli modificada en 1931 por Harry O. Wood y Frank Neuman. (Espíndola y Jiménez, 2001)

- I. Sacudida sentida por muy pocas personas en condiciones especialmente favorables.
- II. Sacudida sentida sólo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos altos de los edificios. Los objetos suspendidos pueden oscilar.
- III. Sacudida sentida claramente en los interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios, muchas personas no lo asocian con un temblor. Los vehículos de motor estacionados pueden moverse ligeramente. Vibración como la originada por el paso de un carro pesado. Duración estimable.
- IV. Sacudida sentida durante el día por muchas personas en los interiores, por pocas en el exterior. Por la noche algunas despiertan. Vibración de vajillas, vidrios de ventanas y puertas; los muros crujen. Sensación como de un carro pesado chocando contra un edificio, los vehículos de motor estacionados se balancean claramente.
- V. Sacudida sentida casi por todo el mundo; muchos despiertan. Algunas piezas de vajillas, vidrios de ventanas, etcétera, se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Se detienen los relojes de péndulo.
- VI. Sacudida sentida por todo mundo; muchas personas atemorizadas huyen hacia afuera. Algunos muebles pesados cambian de sitio; pocos ejemplos de caída de aplanados o daño en chimeneas. Daños ligeros en construcciones.
- VII. Advertido por todos. La gente huye al exterior. Daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción. Daños ligeros en estructuras ordinarias bien construidas; daños considerables en las débiles o mal planeadas; ruptura de algunas chimeneas. Sentido por las personas conduciendo vehículos en movimiento.
- VIII. Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno; considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial; grande en estructuras débilmente construidas. Los muros salen de sus armaduras. Caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados se vuelcan. Arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades. Cambio en el nivel del agua de los pozos. Pérdida de control en las personas que conducen carros de motor.
- IX. Daño considerable en las estructuras de diseño bueno; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial. Los edificios salen de sus cimientos. El terreno se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen.
- X. Destrucción de algunas estructuras de madera bien construidas; la mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen con todo y cimientos; agrietamiento considerable del terreno. Las vías del ferrocarril se tuercen. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes. Invasión del agua de los ríos sobre sus márgenes.
- XI. Casi ninguna estructura de mampostería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el terreno. Las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio. Hundimientos y derrumbes en terreno suave. Gran torsión de vías férreas.
- XII. Destrucción total. Ondas visibles sobre el terreno. Perturbaciones de las cotas de nivel. Objetos lanzados en el aire hacia arriba.

ANEXO II

