
EFFECTOS DEL HUNDIMIENTO REGIONAL EN LOS CAMBIOS DE PERIODO DOMINANTE DEL SUELO DE LA CUENCA DE MÉXICO: PROPUESTA DE NUEVOS MAPAS PARA LAS NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTAREAS PARA DISEÑO POR SISMO (NTCDS).

José Martínez González¹, Javier Lermo¹, Eduardo Ismael¹, Joel Angulo¹

RESUMEN

En este trabajo se describe en general las últimas campañas de vibración ambiental realizadas dentro de la Ciudad de México. Además se evalúa el cambio de los periodos fundamentales de vibración del suelo por efecto del hundimiento regional en la zona lacustre de la Cuenca de México en los últimos 20 años. Hasta el momento se ha logrado conformar una base de datos con aproximadamente 1200 datos de aceleración y vibración ambiental. Con esta información se proponen nuevos mapas de zonificación y periodos dominantes del suelo para NTCDS para el Distrito Federal.

ABSTRACT

This paper describes in general the latest environmental vibration campaigns conducted in Mexico City. It also evaluates the change of the fundamental periods of vibration of the ground by regional subsidence effect of lake area of the Basin of Mexico in the last 20 years. So far it has been able to form a database with approximately 1200 points from environmental vibration and acceleration. This information is proposing new zoning maps and dominant periods of ground to NTCDS for the Distrito Federal.

INTRODUCCIÓN

Hablar del hundimiento que se presenta en la Ciudad de México por efecto de la compactación de las masas arcillosas, es hablar de la generación de agrietamientos, daños estructurales a vivienda y a la infraestructura, así como de zonas propensas a inundaciones. Aunado a lo anterior, este fenómeno también ha provocado un cambio en las propiedades dinámicas del suelo, que deriva un cambio en los valores de periodo dominante. El objetivo del trabajo consistió en evaluar el cambio en los periodos dominantes que ha tenido el subsuelo en un lapso de 20 años por efecto del hundimiento regional dentro de la Cuenca de México. Se analizaron 60 registros de aceleración de las redes del CIRES y del Instituto de Ingeniería UNAM, de los años 2009-2010, así como 860 datos de microtemores registrados en diferentes sitios de la Cuenca, con mayor énfasis en las zonas del Peñón de los Baños, del Marqués, poniente del cerro de la Estrella (paleovalle Culhuacán) y la delegación Iztapalapa, aplicando para ambos registros la técnica del cociente espectral de Nakamura (HVNR) así como la técnica estándar para los datos de aceleración. Con toda esta información se realizó un comparativo con 120 valores obtenidos en el trabajo de Lermo *et al.* (1990). El anterior análisis generó una relación que describe el cambio del subsuelo por el hundimiento, reflejando que este cambio se presenta a partir de $T_0=1.2s$, significando que las zonas de Lomas y Transición presentan de muy poca a nula variación, a diferencia de la zona de Lago que presenta mayores cambios. Esta relación nos permitió actualizar los registros obtenidos en 1990 e integrarlos en una base de datos actualizada para el año 2010, conformada por cerca de 1200 datos. Finalmente se proponen nuevos mapas para el D.F.: mapa de zonificación para diseño por sismo, mapa de periodos predominantes del subsuelo para las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

ANTECEDENTES

A raíz de los sismos de septiembre de 1985 que causaron grandes daños en la infraestructura así como pérdidas humanas, comenzó a estudiarse el riesgo sísmico detalladamente para la ciudad de México con el fin de mitigar daños ante futuros eventos sísmicos. Los estudios realizados señalan que el principal

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Torre de Ingeniería, 2do. Piso, Ala Sur, Cub. 8, Cd. Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F., Tel. (01-55) 56233500 ext.1264, jmartinezgo@iingen.unam.mx, jles@pumas.iingen.unam.mx, eismaelh@iingen.unam.mx, janguloc@iingen.unam.mx

factor en los efectos de sitio fue el contraste de impedancia entre la capa de arcilla y su substrato. En 1987 se publica el primer mapa de isoperiodos para el Distrito Federal, elaborándose con 99 mediciones de los cuales 9 corresponden a estaciones acelerográficas y 90 a datos de vibración ambiental. Posteriormente a la publicación de este primer mapa, se realizaron mediciones adicionales de periodos dominantes utilizando registros de microtemores y de movimientos fuertes en un gran número de puntos adicionales a los que se disponía en 1987

Lermo *et al.* (1992) constituyeron una recopilación de las mediciones hechas por otros autores (Singh *et al.*, 1988; Lermo *et al.*, 1988, Otero *et al.*, 1989; CIS, 1991; Lermo y Becerra, 1991; Mendoza *et al.*; 1992) además realizaron mediciones en zonas que se encontraban lejos de estaciones acelerográficas de aquel entonces o de mediciones anteriores, así como registro de temblores pequeños en una red temporal de sismógrafos. Con toda la información disponible elaboraron un mapa de isoperiodos para el Distrito Federal con aproximadamente 500 datos. Lermo y Chávez (1994) mediante el análisis de 81 estaciones acelerográficas y 409 registros de microtemores, cubriendo la mayoría de la ciudad, desarrollaron un mapa de periodos dominantes para la Cuenca de México (Figura 1).

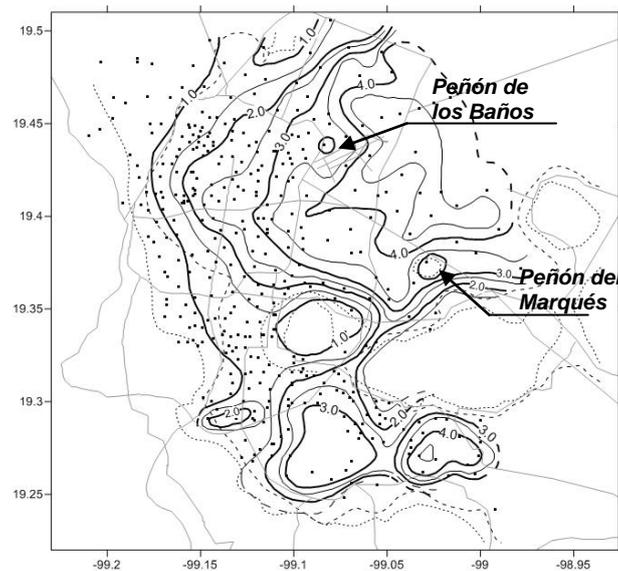


Figura 1 Mapa de isoperiodos para la ciudad de México (Lermo y Chávez, 1994).

Posteriormente en 2004, en la página 4 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, se presenta un mapa de zonificación para fines de diseño por sismo del suelo (Figura 2), donde mencionan que el límite entre la zona de Lomas y la zona de Transición es el periodo predominante de 0.5 segundos, mientras que el límite entre la zona de Transición y Lago es el periodo predominante de 1.0 segundos.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Comparando los dos anteriores mapas de isoperiodos, se observan algunas diferencias que merecen ser detalladas. Las primeras son las curvas alrededor del Peñón de los Baños y el Peñón del Marqués, en donde el mapa de las NTCDS, muestra que estas curvas de periodo dominante (3.0 a 4.0 s) prácticamente cruzan por debajo a estos cuerpos volcánicos, sin embargo el mapa de Lermo y Chávez, 1994, si resaltan curvas de isoperiodos menores a los 3.0 y 4.0 segundos alrededor de estas dos estructuras geológicas.

Por otro lado, observando el primer mapa de isoperiodos desarrollado por Lermo y Chávez, vemos que ellos no trazaron la curva predominante de 0.5 segundos así como la curva de 1.0 segundo solamente en la zona oeste, ya que en el resto de la ciudad no se dispone de información de registros de sismos o registros de microtemores para que esta curva tuviera continuación; sin embargo el mapa de las NTCDS (Figura 2), presenta estas dos curvas que separan dos grandes zonas geotécnicas (la zona de Lomas y Transición), las cuales probablemente fueron trazadas con información geotécnica. En la Figura 2 se presentan 87 datos comprendidos entre 0.5 – 1.0 segundos, obtenidos del trabajo de Lermo *et al.* (1992), con los cuales fueron establecidos los límites anteriormente citados. Nótese como la mayor concentración

de estos se localiza en la parte poniente, sin embargo para la zona norte, sur y oriente prácticamente no se tiene información para poder establecer con certeza estos límites.

Por último, el mapa de la Figura 2 resalta que la zona comprendida al poniente del cerro de la Estrella está considerada como zona de Transición debido a la falta de registros ya sea de microtremores o de aceleración. Esta zona conocida también como paleovalle Culhuacán (Mooser, 1990) formaba parte de la hidrología de la antigua cuenca drenando las aguas de norte a sur hasta antes de la actividad volcánica que diera origen a la sierra de Chichinautzin. Este evento geológico provocó el relleno de este canal, lo que indicaría la presencia de importantes espesores de arcilla, por lo que debería ser considerada como zona de Lago. De las anteriores observaciones, se procedió a realizar campañas de vibración ambiental alrededor de los peñones del Marqués y de los Baños para determinar la curva predominante de 0.5 segundos; así también en la zona del paleovalle Culhuacán para caracterizar con mayor certeza esta zona.

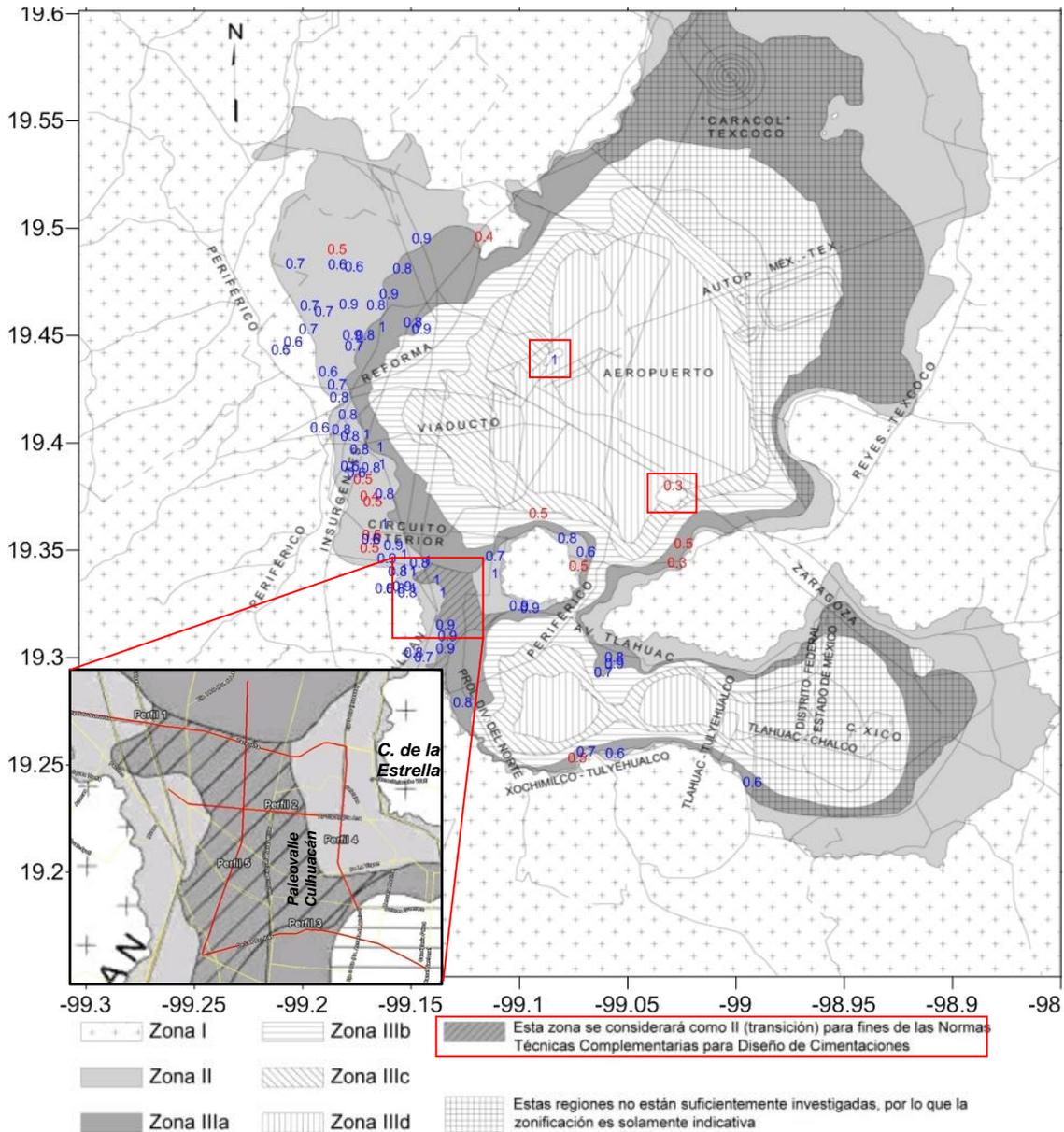


Figura 2 Mapa de zonificación de diseño por sismo del suelo vigente para las NTCDs, 2004. Las zonas en recuadro rojo presentan las inconsistencias citadas.

En los últimos años diversos autores (Ovando *et al.*, 2007; Aguilar, 2008; Avilés *et al.*, 2010) han venido estudiando el cambio en las propiedades dinámicas del suelo por efecto del hundimiento regional en la ciudad de México. Ovando *et al.* mostraron que este fenómeno ocasiona una consolidación del terreno, que a su vez genera un aumento en los esfuerzos de cizalla efectivos que modifican tanto el módulo de

cortante, como la velocidad de propagación de ondas S de los depósitos lacustres. Estos autores (*ibid*) proponen que esto deberá verse reflejado en una revisión constante de los mapas de zonificación y de los espectros de diseño asociados.

DATOS

En todas las mediciones de microtremores para estimar la frecuencia predominante del suelo, se realizaron con acelerómetros K2 de Kinematics con respuesta plana hasta de 50 Hz, un rango dinámico de 114 db y resolución de 19 bits, con un muestreo de 100 muestras/segundo. La duración de los registros adquiridos en cada sitio fue de 180 segundos.

A partir de 2009 se han venido realizando una serie de mediciones de vibración ambiental dentro del Distrito Federal y haciendo uso de la técnica del cociente espectral de Nakamura (HVNR) para estimar la frecuencia fundamental del suelo. Una de las zonas en las que se ha puesto mayor atención ha sido la delegación Iztapalapa por presentar un importante número de agrietamientos provocados por efecto del hundimiento regional. Entre agosto y octubre de 2009 se realizaron 123 mediciones de microtremores en la colonia Lomas de San Lorenzo, con el objetivo de determinar la causa que provocó la aparición de una socavación aparecida en el mes de julio de 2007 en la calle Vista Hermosa esquina con Guadalupe Victoria producida por el flujo de agua en una grieta que atraviesa a esta colonia. En ese trabajo se encontró mediante el análisis en la distribución de las curvas de isoperiodos que la dirección de propagación de la grieta era muy similar a la configuración de las curvas de periodo dominante. Mediante sondeos geotécnicos se comprobó que este agrietamiento es ocasionado por la presencia de un derrame volcánico proveniente de la sierra de Santa Catarina (Espinoza, 2011). Del resultado obtenido en ese estudio se realizaron 116 mediciones más dentro de la delegación Iztapalapa, principalmente en lugares donde se carecía de información, para inferir zonas con potencial de generar grietas por transición brusca.

Entre agosto y noviembre de 2010 se tomaron 153 registros de vibración ambiental ubicados en diferentes delegaciones como Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Iztapalapa y Tláhuac. De ésta última, en la colonia Del Mar se presenta una familia de grietas que inclusive continúan en la delegación Iztapalapa. Este sitio ubicado en zona de Lago y aproximadamente a 4 km de distancia de la parte baja de la sierra de Santa Catarina nos hizo plantear la hipótesis de que estos agrietamientos se debían a otros mecanismos de generación de grietas como pudiera ser por fracturamiento hidráulico o por irregularidades estratigráficas. Se tomaron 36 registros de microtremores distribuidos a lo largo de esta colonia. Dentro de esta zona de estudio se dispone de datos del anterior trabajo (Lermo y Chávez, 1992) dando un total de 59 registros dentro de la zona. Con esta información se hizo un análisis e interpretación de los valores de periodos presentes. Se encontró un incremento muy rápido y en cortas distancias de los valores de periodo. Generado el mapa de isoperiodos de la zona se encontró una gran similitud entre la geometría de estas curvas y la localización de los agrietamientos. De esto se propone que esta serie de agrietamientos son ocasionadas por un derrame volcánico en profundidad proveniente de la sierra de Santa Catarina (Martínez, 2011). En la Figura 3 se muestra esta propuesta.

En mayo de 2010 se realizó una campaña de vibración ambiental, ésta ubicada al poniente del cerro de la Estrella (paleovalle Culhuacán) en donde se definieron 5 perfiles de medición, ubicados sobre los principales ejes viales que cruzan a esta zona, orientados de norte-sur y este-oeste. En la Figura 2 estos perfiles se muestran en líneas rojas. En dirección este-oeste, sobre la avenida Taxqueña esquina con Eje 3 Ote. y hasta Miguel A. Quevedo esquina con Pacífico (Perfil 1) se tomaron 30 registros de vibración ambiental con una separación entre sí de 150 metros. El Perfil 2 se realizó entre avenida La Virgen casi esquina con calzada de Tlalpan y siguiendo por Av. Santa Ana con un total de 30 registros con una separación aproximada de 110 metros. En la calzada de las Bombas (Perfil 3), desde Preparatoria 5 hasta UAM-X se tomaron 30 registros con una separación aproximada de 100 metros. En dirección norte-sur, sobre la avenida Eje 3 Oriente (Perfil 4), desde calzada de las Bombas hasta casi esquina con avenida Taxqueña se adquirieron 30 registros con aproximadamente 100 metros entre sí. El Perfil 5 se localiza sobre un camellón que inicia en el cruce de calzada de Las Bombas y calzada del Hueso, y sobre la calle Mar de la Tranquilidad, que se convierte en Av. Ejido de San Francisco Culhuacán y posteriormente Paseo de la Luz. Se adquirieron 34 registros equidistantes aproximadamente a 125 metros. Con esta distribución de los perfiles se caracterizó con mayor certeza prácticamente toda esta zona, aunado a esto se complementa con la información que ya se disponía del trabajo de Lermo y Chávez (1992).

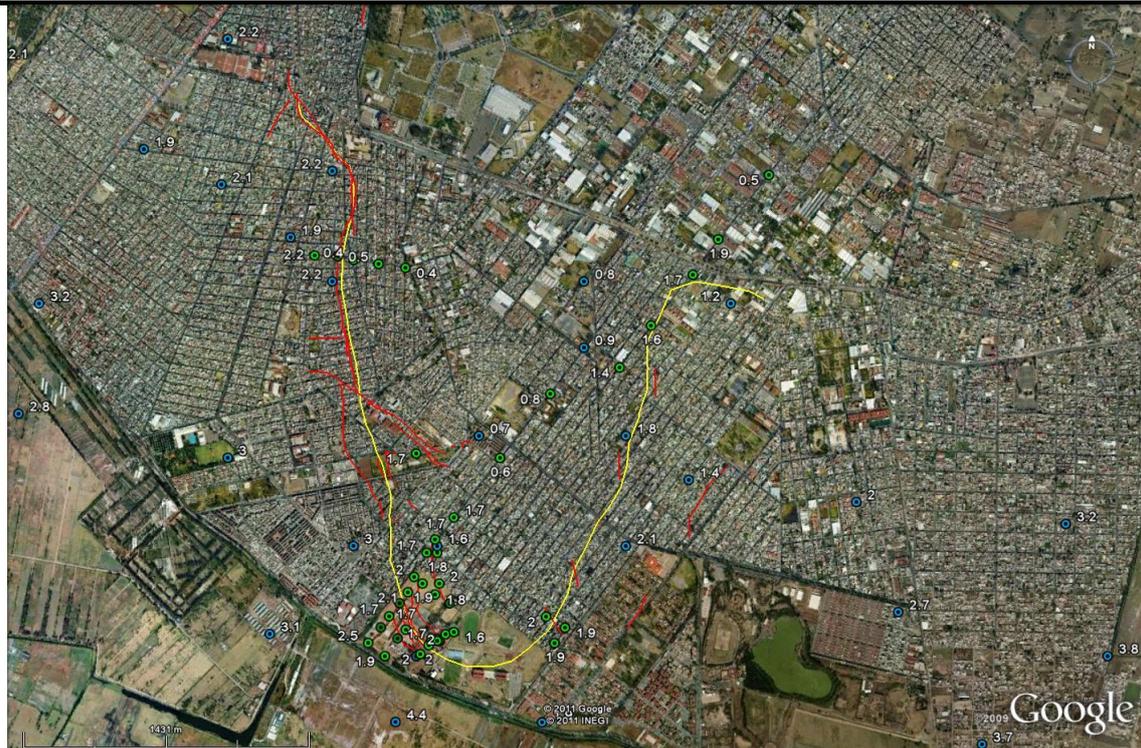


Figura 3 Localización espacial de la propuesta de derrame volcánico de la Sierra de Santa Catarina delimitado con línea amarilla. Las líneas en rojo representan los agrietamientos existentes en la parte oriente de la delegación Iztapalapa y poniente de la delegación Tláhuac. Los puntos en azul corresponden a Lermo (1992) y el resto de ellos se adquirieron para este estudio.

Por otro lado, en marzo de 2011 se emprendió una campaña de microtemores alrededor del peñón de los Baños y del Marqués, obteniéndose 59 y 78 registros, respectivamente. Con estos datos se pudo definir con mayor certidumbre la curva 0.5 y 1.0 segundos para ambos sitios (Figura 6).

Durante la integración de los datos recientes de las campañas mencionadas, se observó que se estaba presentando una diferencia significativa en el valor de periodo dominante en sitios donde coincidió que se tenían datos actuales y de hace aproximadamente 20 años. Ante esto, en noviembre de 2010, se realizó una campaña de adquisición de datos de microtemores en 24 sitios instrumentados con acelerómetros en ésta ciudad; la duración de los registros en estos sitios fue de 30 minutos. Las estaciones donde se realizaron estas mediciones se presentan en color verde en la Figura 4 y los resultados se muestran en la Tabla 1. Aunado a lo anterior y para tener una mayor cantidad de información reciente en todo el Distrito Federal, así como para validar los valores obtenidos con registros de vibración ambiental, se analizaron registros de aceleración de todas las estaciones de la red sísmica CIRES y para las estaciones SCT y CDAO del IdeI, UNAM, mediante la técnica de Nakamura y el método Estándar, usando como estación de referencia CU. Los registros de aceleración analizados refieren a eventos sísmicos ocurridos entre el año 2009 y 2010. Con éstas técnicas se infirió la frecuencia dominante así como su amplitud relativa para este tipo de registros. Esta información también se presenta en la Tabla 1, que resume el cambio en los valores de periodo dominante para un periodo aproximado de 20 años en distintos sitios del Distrito Federal por efecto del hundimiento regional. En las primeras columnas se muestra la clave de la estación acelerométrica y la institución que la administra. De la tercera a la sexta columna muestran los periodos dominantes del suelo obtenidos con datos de aceleración o sismos para el año de 1990 y 2010, respectivamente. La séptima y octava columna indican el periodo dominante del suelo inferido con mediciones de microtemores, de igual manera para los años 1990 y 2010, respectivamente. La Figura 4 presenta una recopilación, en base a datos de aceleración y microtemores, de toda la información con que se dispone.

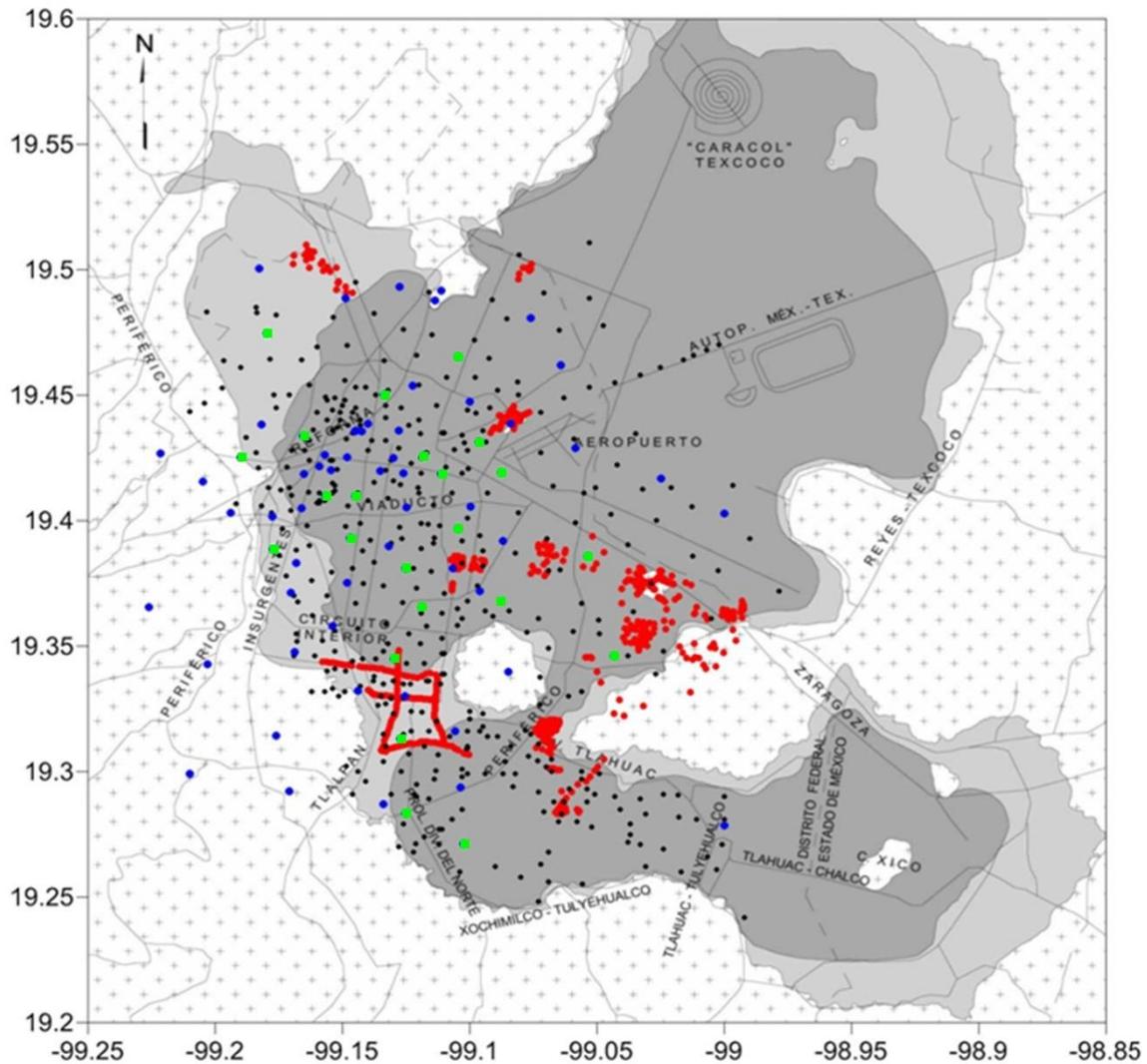


Figura 4 Localización de sitios medidos.

Los puntos en color rojo representan la ubicación de los sitios recientes medidos con microtremores. Los puntos en color azul representan los sitios analizados con datos de aceleración recientes. El resto de la información, en puntos negros, indican la localización de los sitios medidos por Lermo *et al.* (1992).

RESULTADOS

Descritos los trabajos realizados en los últimos años, se tiene ahora más de 1200 datos de vibración ambiental y de aceleración, que han ayudado a caracterizar con mayor precisión las características sísmicas de la ciudad de México. Estos trabajos traen consigo una actualización importante en los valores de periodo para algunas zonas, y por otra parte ayudan a caracterizar sitios donde no se disponía de información.

En la zona del paleovalle Culhuacán, analizando la distribución espacial de los registros, se verifica que en su parte central se presentan valores entre 1.1 y 1.5 segundos, lo que según el actual reglamento esta zona se clasifica como zona IIIa. En la parte sureste, en el cruce de Eje 3 y calzada Las Bombas y en dirección hacia el lago de Xochimilco se presentan un aumento rápido en los valores periodo de 1.5 a 2.4 segundos en una distancia de 1.3 km.; concluyéndose que esta parte de la ciudad pertenecería a la zona IIIb. Cabe mencionar que estas mediciones presentan una excelente correlación nominal con los valores obtenidos a través de los datos de aceleración recientes. Por último, mediante la distribución de los perfiles propuestos se detalló el límite entre la zona de Transición y la zona de Lago.

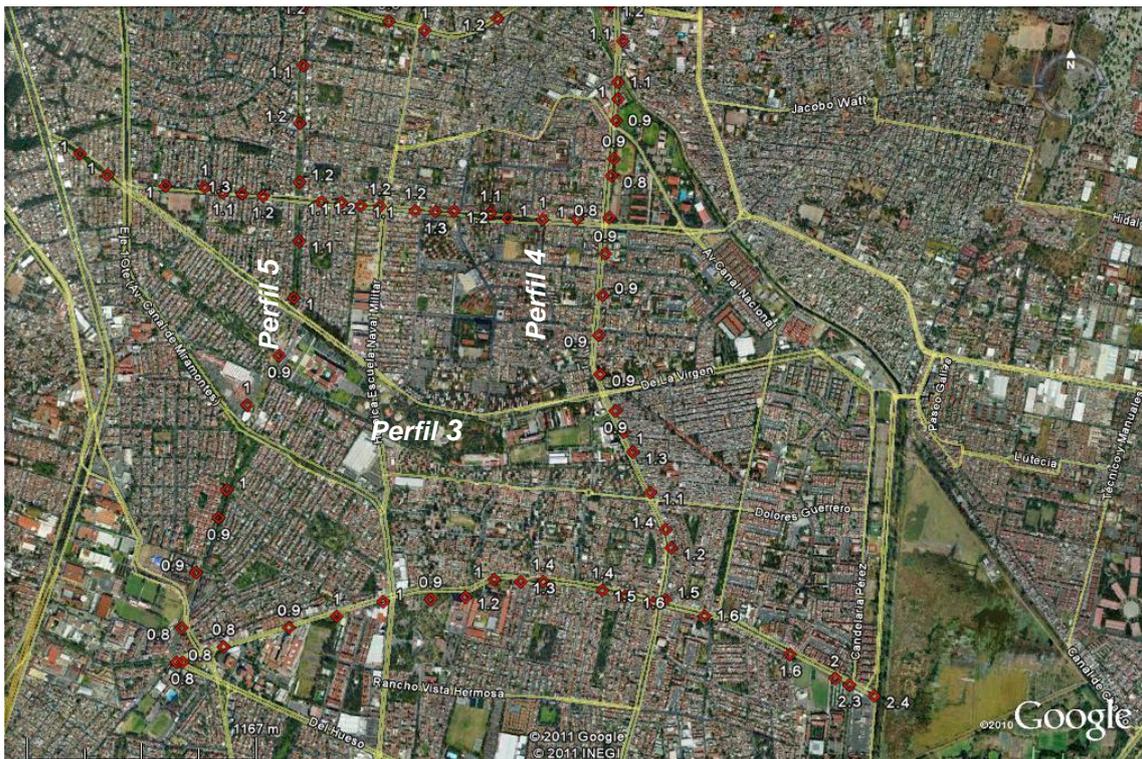


Figura 5 Microzonificación de la zona de estudio paleovalle Culhuacán. Se presenta la localización de los sitios donde se estimó el periodo dominante en segundos.

Para los alrededores del peñón de Los Baños así como para el peñón del Marqués se obtuvieron los límites para las zonas de Loma-Transición y Transición-Lago. Para el peñón de los Baños se presenta una transición sumamente rápida hacia los depósitos de lago en sus alrededores. Para el peñón del Marqués también se presenta una transición abrupta entre los depósitos de loma y los depósitos de lago. Esto explica la aparición de agrietamientos alrededor de esta anomalía geotécnica, clasificando la generación de estas grietas por transición abrupta.

hundimientos de aproximadamente 11 m. Además presentan un análisis de velocidades de hundimiento, concluyendo que la zona del ex-lago de Texcoco y la zona de Chalco presentan las mayores velocidades de hundimiento con tasas de 30 a 35 cm/año, para un periodo de 2000 a 2005.

En la Figura 7, se muestra la variación espacial observada de los valores de periodo dominante para el periodo de 1990 a 2010 (ver Tabla 2). Los puntos azules representan una variación entre 0 y 0.1s, los puntos verdes varían entre 0.2 a 0.3s, y los puntos rojos presentan los mayores comprendidos entre 0.4 a 0.9s. Analizando la distribución de estos sitios, se aprecia que las zonas que han presentado el mayor cambio se localizan dentro de la zona de Lago, donde existe el mayor espesor de arcilla, principalmente el suroriente del Aeropuerto en lo que sería la Ciudad Nezahualcóyotl con un cambio de 0.7 segundos y Chalco donde se tienen cambios de 0.9 segundos. Destáquese que existe una correlación directa entre la magnitud del hundimiento y el cambio de periodo dominante.

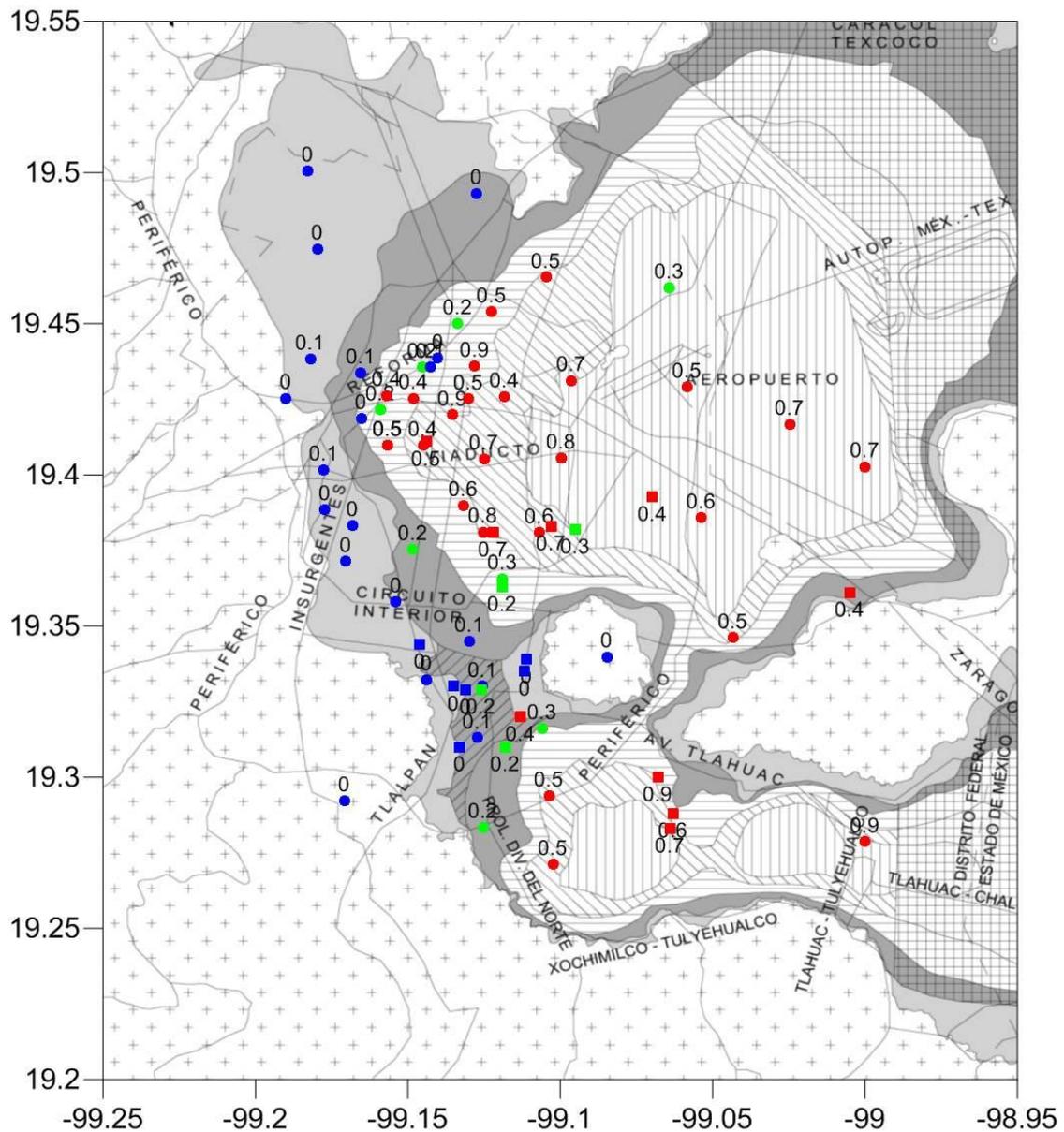


Figura 7 Distribución de sitios observados que presentan un cambio en el periodo dominante del suelo.

Analíticamente este cambio se muestra en la Figura 8. Esta gráfica presenta la comparación en el valor de periodo dominante de 102 sitios para los años 1992 y 2010. Estos sitios están localizados en distintas zonas de la ciudad de México, abarcando prácticamente toda su extensión. Esta figura presenta dos curvas

de mejor ajuste para dos conjuntos de datos. La primera curva, en color rojo, con muestra el mejor ajuste de valores para un intervalo de 0.4 a 1.1 segundos. Esto significa que para valores de hasta 1.1 segundos el cambio ha sido prácticamente nulo. Desde el punto de vista geotécnico, la zona de Transición ha sufrido de poca a nula variación por efecto del hundimiento regional. La segunda curva, en color azul, con se ajusta al resto de los datos, esto es desde 1.2 a 5.2 segundos. Para el intervalo de 1.2 a 5.2s se aprecia una dispersión aproximada de $\pm 0.5s$, lo cual se mantiene en todo el rango.

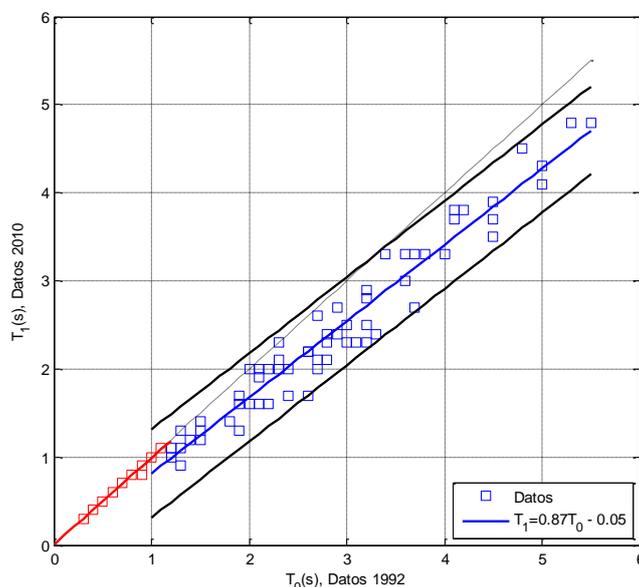


Figura 8 Comparativo entre los valores de periodo para el año 1992 y 2010 en 102 sitios de ciudad de México.

La gráfica anterior arroja que el comportamiento sísmico por efecto del hundimiento regional para la zona de lago para un periodo aproximado de 20 años está dado por la ecuación 1

(1)

donde T_0 representa el valor de periodo dominante para 1992, T_1 el valor corregido por efecto del hundimiento para el año 2010.

Cabe mencionar que aunque se observa la presencia de un cambio generalizado en los valores de periodo dominante por efecto del hundimiento dentro de la cuenca de México, en este trabajo se encontraron 9 sitios dentro de la zona de Lago que permanecen sin cambio en su valor de periodo dominante o al menos con una variación máxima de 0.1 segundos. En este trabajo se han discutido los factores que podrían estar ocasionando estos cambios diferenciales en los valores de periodo dominante, a lo que hemos concluido que los principales factores tienen que ver con las tasas de extracción de agua, o bien cambios estratigráficos importantes del subsuelo.

A partir de la Ecuación 1 corregimos los datos contenidos en el trabajo de Lermo *et al.*. Es importante mencionar que tras haber realizado las correcciones para los datos de 1990 y tras su integración con los datos actuales, se encontró una excelente correlación espacial y nominal entre ellos. De lo anterior y de acuerdo con Ovando *et al.* (2007) la consolidación del terreno modifica tanto el módulo de cortante como la velocidad de propagación de ondas S, además de la disminución del espesor del acuitardo. Por lo anterior, estos cambios se verán reflejados en los valores de periodo dominante, conllevando una constante revisión y modificación de los mapas de zonificación.

En las imágenes que conforman la Figura 9, se muestra la comparación de cuatro razones espectrales obtenidas con registros de microtremors en las cuales se aprecia en líneas negras, el periodo dominante del subsuelo para el año 1990 (Lermo *et al.*, 1992), mientras que las líneas en color azul representan el espectro para el año de 2010. Se aprecia claramente un desplazamiento para todas las razones espectrales de 2010 hacia la derecha. Por citar alguno, para el sitio CDAO se tiene cambio de periodo de 0.05 Hz, en cambio para el sitio UC44 el cambio de periodo fue de 0.35 Hz. Cabe destacar que tanto los espectros en negro y color, para cada uno de los sitios, presentan gran similitud entre sí conservando sus principales

formas características. Este corrimiento se traduce en que el subsuelo en casi 20 años ha presentado una consolidación importante que ha modificado las propiedades dinámicas del subsuelo.

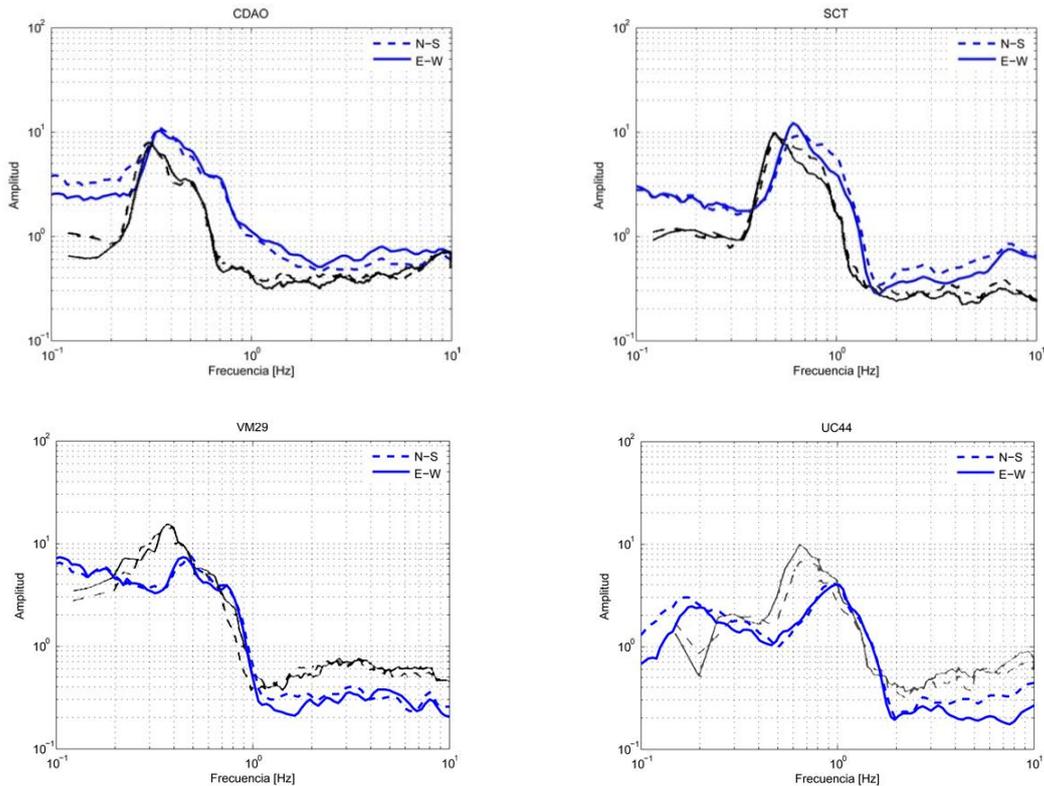


Figura 9 Comparativo entre la señal de 1992 (línea en negro) y 2010 (línea a color) para diferentes sitios.

De las imágenes anteriores se concluye que es necesario actualizar la información de la que se dispone, ya que los valores de periodo dominante con los que se cuenta ya no son representativos de las condiciones actuales que presenta la Cuenca de México. El mapa de isoperiodos que se encuentra publicado en las vigentes Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo para el Distrito Federal, resulta entonces ser obsoleto y de igual forma, no representativo de las propiedades actuales del subsuelo; siendo necesario realizar más mediciones en zonas en las que aún no se cuenta con información así como en zonas donde ya se dispone de información, para afinar el comportamiento del suelo por efecto del hundimiento. El objetivo de esto será actualizar el vigente mapa, que sea apegado a las condiciones reales del terreno, con el fin de evitar daños que podrían derivar en pérdidas humanas en el caso de presentarse un sismo considerable. Avilés y Pérez-Rocha (2010), en su trabajo presentan la evaluación de los efectos del hundimiento regional sobre la respuesta sísmica de los suelos de la ciudad de México. Tal evaluación se realiza mediante un método empírico que hace uso de información contenida en las normas vigentes para diseño por sismo y de datos obtenidos de 100 estaciones acelerométricas y 500 registros de microtemores, además de información de 960 bancos de nivel. Lo anterior permitió “predecir” para el año 2055 los valores de T_s y H_s , así como los posibles cambios en los valores de las ordenadas espectrales. Sin embargo, tales predicciones pueden presentar un sesgo importante con relación a lo esperado para ese periodo de tiempo, pues en otros trabajos realizados (Ovando-Shelley *et al.*, 2007) se ha dejado en manifiesto que existen muchos factores que deberían considerarse para tales predicciones. Además, si se parte de los mapas contenidos en las normas vigentes, se puede estar proyectando a futuro datos que no necesariamente corresponden a lo observado en años recientes. Tal es el caso del mapa de isoperiodos que contienen las normas y del mapa propuesto en el presente trabajo. Donde se observan diferencias importantes principalmente en los límites de las zonas II y III. En la Figura 10 se presenta el mapa de isoperiodos propuesto por estos autores para el año 2055. Sin embargo siguen cometiendo el mismo error de omitir las curvas de periodo dominante en las zonas anteriormente descritas en este trabajo. De lo anterior, resulta complicado tratar de predecir el comportamiento dinámico de los suelos para el futuro, y más aún si solo se tiene como punto de partida un conjunto limitado de datos. Ciertamente resulta difícil y complicado tratar de explicar estos cambios

mediante regresiones y aplicando estadística por la gran heterogeneidad del suelo así como por sus propiedades dinámicas.

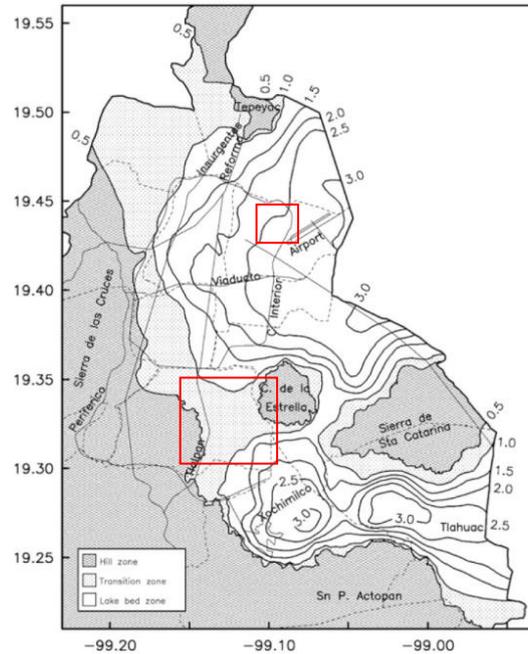


Figura 10 Mapa de isoperiodos propuesto para el año 2055 (Avilés et al., 2010). Los recuadros en rojo muestran las inconsistencias citadas en este trabajo.

Finalmente como resultado del análisis anteriormente descrito, en la Figura 11 se presenta una propuesta de actualización del mapa de periodos dominantes del suelo para la ciudad de México para el año 2010. Este fue generado con toda la información disponible, esto es mediante la actualización de 305 datos (Lermo *et al.*, 1992) corregidos mediante la Ecuación 1; las mediciones realizadas entre 2009 – 2010 y los registros más recientes de aceleración y microtemores medidos en las estaciones acelerométricas. En total este mapa se realizó con aproximadamente 1200 datos, que conforman nuestra base de datos.

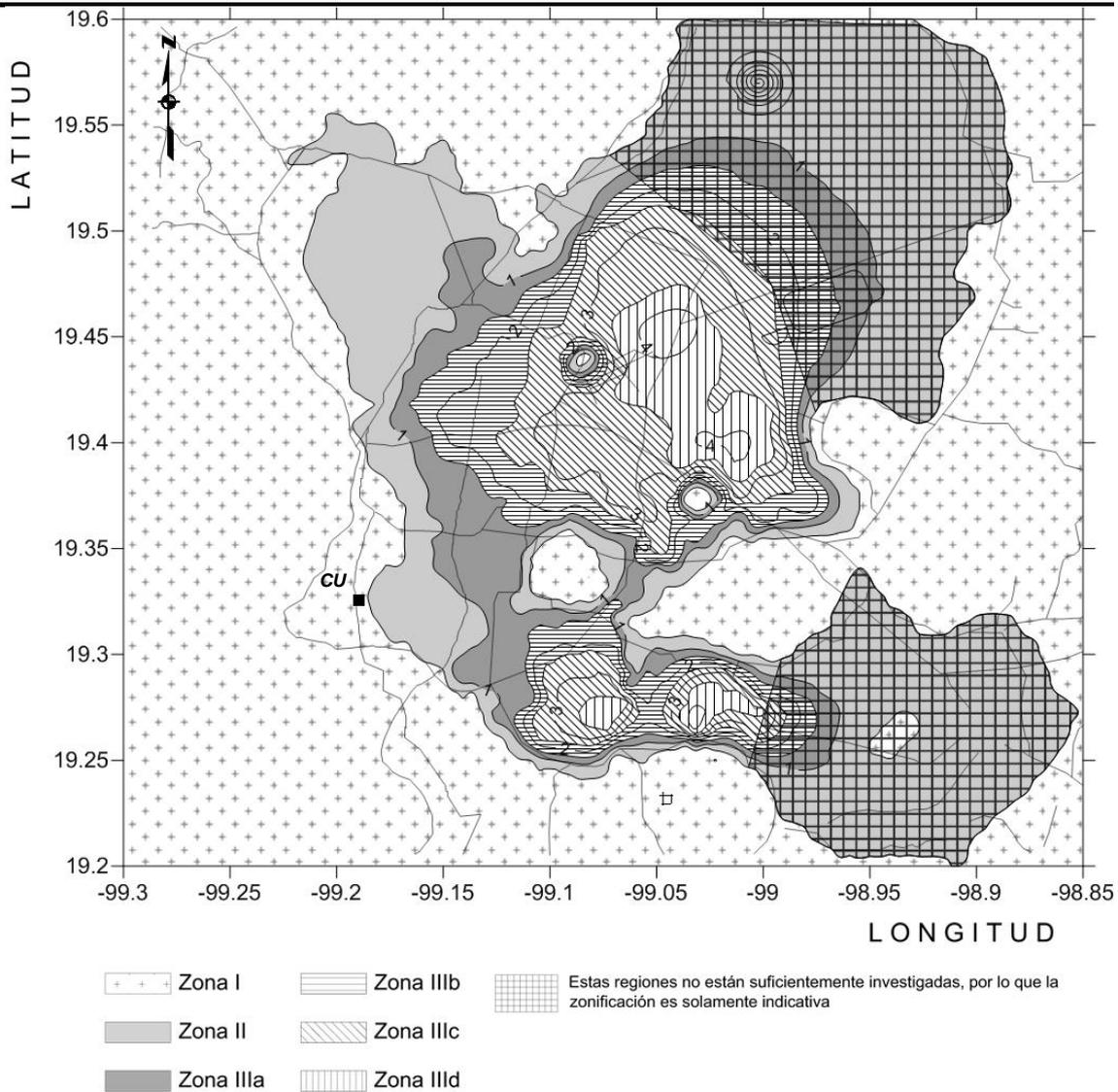


Figura 11 Propuesta de mapa de zonificación para diseño por sismo para el Distrito Federal.

Tras la generación de este mapa, surgieron algunas observaciones y diferencias con el actual mapa de las NTCDS. A continuación se enlistan.

- i. Se modificó el límite de 0.5s en la zona comprendida entre Cerro de la Estrella y Ciudad Universitaria.
- ii. En comparación con el actual mapa, se modificaron las curvas de isoperiodo alrededor del Peñón de los Baños y el Peñón del Marqués, que resulta ser mucho más lógico y apegado con la geología.
- iii. Ha habido un corrimiento de las curvas de nivel, principalmente a partir de $T_0 = 1.5s$ hacia el oeste. Así mismo la distancia entre curvas se ha ampliado.
- iv. Se modificó sustancialmente la curva de $T_0 = 1.0s$ principalmente en la parte noroeste de la ciudad.
- v. No se dispone de información en zonas del Ex-Lago de Texcoco como en la parte de Chalco. Es por ello que la zonificación es tentativa para estos sitios.

CONCLUSIONES

1. Se adquirieron poco más de 700 datos con lo que se tiene un mejor control en la cuenca de México.

2. Se presenta un cambio en la geometría de la curva 0.5 segundos para la zona comprendida entre cerro de la Estrella y Ciudad Universitaria con respecto al mapa vigente.
3. Se pudo comprobar cuál es la variación de periodo dominante, por lo cual hemos observado que la zona de Lomas no varía, en zona de Transición existe una variación de 0.1 a 0.2s, mientras que en la zona de Lago se presenta una variación mayor a los 0.3s, llegando en algunos sitios hasta 0.9s.
4. Estas variaciones están ligadas con el fenómeno del agrietamiento, especialmente en las zonas de Chalco, Iztapalapa y Tláhuac, es de esperarse que con el tiempo se acentúe este problema en estas mismas zonas.
5. En algunas zonas existe una discrepancia entre la curva 0.5 segundos y el límite impuesto mediante la geotecnia.
6. Se presenta una propuesta de mapa de zonificación para diseño por sismo para el Distrito Federal para el año 2010. Con el objeto de tener una idea clara de la variación de las curvas de periodo, se enumeran a continuación las principales cambios observados:
 - a. Se aprecia que la curva de 4 segundos prácticamente ha desaparecido
 - b. La curva de periodo 1.0 segundos ha sufrido un cambio en su forma al noroeste de la ciudad y en la zona del paleovalle Culhuacán se verificó que pertenece a zona IIIa.
 - c. La zona IIIb presenta un cambio en su extensión en la parte central.
 - d. Las zonas IIIc y III d disminuyeron marcadamente.

RECOMENDACIONES

Esta propuesta presenta las siguientes limitaciones:

- i. Dado que en la parte norte y sur no se tienen datos medidos de periodo dominante, la curva 0.5 segundos resulta ser probablemente incierta, ya que fue impuesta en base a información geotécnica.
- ii. Es necesario realizar más mediciones, sobretodo en las zonas faltantes de información así como en las partes bajas de los cuerpos montañosos.
- iii. Dado que la sobreexplotación de los mantos acuíferos ha provocado estos grandes cambios de periodo dominante en la zona de Lago, es necesario poner mayor énfasis en las observaciones y mediciones dentro de esta zona.

Tabla 1 Relación de las estaciones acelerométricas medidas. La columna T_{A0} y T_{M0} muestra los periodos para 1992. Los datos de la columna T_{A1} y T_{M1} representan los valores recientes, 2010. Las columnas con números en negro indican el cambio de periodo en 18 años.

INSTITUCIÓN	ESTACIÓN ACELERO_ GRÁFICA	DATOS DE ACELERACIÓN				MICROTREMORES		
		Técnica Estándar		$T_{A0} - T_{A1}$	Nakamura	1990	2010	$T_{M0} - T_{M1}$
		1990 T_{A0}	2010 T_{A1}		2010 T_{AN}	T_{M0}	T_{M1}	
CIRES	AL01	2.1	1.9	0.2	1.8			
CIRES	AE02	5.3	4.8	0.5	4.8			
CIRES	CJ03	2.1	1.6	0.5	2			
CIRES	CJ04	2.1	1.6	0.5	2	2.2	2	0.2
CIRES	CI05	2	2	0	1.9			
CIRES	XP06	3.3	2.4	0.9	2.9			
CIRES	TE07				0.4			
CIRES	TL08	2.2	2	0.2	1.6	2.2	1.6	0.6
CIRES	VG09	2.8	2.3	0.5	2.5			
CIRES	PE10	2.7	2.1	0.6	2.2			
CIRES	AU11	4.5	3.5	1	4			
CIRES	DM12	4	3.3	0.7	3.4		3.2	
CIRES	TP13	0.6	0.6	0	0.6			
CIRES	AR14	4						
CIRES	MI15	1.5	1.3	0.2	1.3	1.4	1.2	0.2
CIRES	DR16	0.6	0.6	0	0.6			
CIRES	LV17	1.3	1.3	0	1.3			
CIRES	CE18	0.6	0.6	0	0.6			
CIRES	MY19	3	2.5	0.5	2.7	2.8	2.4	0.4
CIRES	NZ20	5	4.3	0.7	4.6			
CIRES	UI21		0.5		0.5			
CIRES	IB22	1.5	1.4	0.1	1.5	1.4	1.2	0.2
CIRES	CE23	4.8	4.5	0.3	4.3			
CIRES	AO24	1	1	0	0.9			
CIRES	GR27	0.8	0.8	0	0.8		0.7	
CIRES	CP28		0.6		0.6			
CIRES	VM29	3.1	2.3	0.8	2.5	2.8	2.1	0.7
CIRES	EO30	0.6	0.6	0	0.6	0.6	0.6	0
CIRES	NZ31	5.5	4.8	0.7	4.1			
CIRES	CE32	4.5	3.9	0.6	4.1	4.2	3.8	0.4
CIRES	TH35	5	4.1	0.9	3.9			
CIRES	XO36	3.8	3.3	0.5	3.7	3.4	3.3	0.1
CIRES	DX37	1	1	0	1			
CIRES	GC38	1.9	1.6	0.3	1.6			
CIRES	BO39	2.9	2.4	0.5	2.6		2.4	
CIRES	IM40		0.6		0.6			
CIRES	PD42	4.5	3.7	0.8	4			
CIRES	JA43	3.2	2.5	0.7	2.9			
CIRES	UC44	1.5	1.4	0.1	1.4	1.5	1.2	0.3
CIRES	BL45	2.6	2.2	0.4	2.2			
CIRES	AU46	0.9	0.9	0	0.9			
CIRES	CO47	0.5	0.5	0	0.5			
CIRES	RM48	3.2	2.3	0.9	3			
CIRES	BA49	2.8	2.4	0.4	2.6		2.5	
CIRES	MT50	0.6	0.6	0	0.6	0.7	0.7	0
CIRES	SP51	2.3	2	0.3	2		1.9	
CIRES	ME52	0.9	0.8	0.1	0.9			
CIRES	SI53	1.4	1.2	0.2	1.2			
CIRES	JC54	1.2	1.1	0.1	1.1	1.1	1.1	0
CIRES	TL55	2.1	2	0.1	1.7			
CIRES	CO56	2.3	2.1	0.2	2.1			
CIRES	ES57	0.9	0.8	0.1	0.8			
CIRES	LI58	2.4	2	0.4	2.1			
CIRES	CA59	3.2	2.8	0.4	3.1		2.7	
CIRES	GA62	2.3	2.3	0	1.9			
CIRES	CT64		0.5		0.5			
CIRES	AP68	3.6	3	0.6	3.2			
CIRES	HJ72	2.9	2.4	0.5	2.8			
CIRES	FJ74		0.4		0.4			
CIRES	RI76		3.3		3.6			
CIRES	CU80	2.9	2.4	0.5	2.9			
CIRES	CH84	1.5	1.4	0.1	1.3			
CENAPRED	TLAS					2.9	2.7	0.2
CENAPRED	ZARS					4.1	3.8	0.3
CENAPRED	UNKS					3.7	2.7	1
IDEI	SCT1	2	1.9	0.1	1.9	2	1.6	0.4

IDEI
CDAO
3.6
3.3
0.3
2.9
3.2
2.9
0.3

Tabla 2 localización de los sitios con los que se comparó el efecto del hundimiento regional en la ciudad de México en los valores de periodo dominante.

Datos Periodo Dominante		Coordenadas		Datos Periodo Dominante		Coordenadas	
1992	2010	Long	Lat	1992	2010	Long	Lat
0.4	0.4	-99.2217	19.4269	2.2	1.6	-99.1336	19.45
0.4	0.4	-99.21	19.299	2.3	2	-99.1189	19.3656
0.5	0.5	-99.2642	19.37	2.3	2.1	-99.159	19.4215
0.5	0.5	-99.1703	19.3714	2.3	1.9	-99.1401	19.4385
0.5	0.5	-99.1137	19.4876	2.4	1.7	-99.064	19.283
0.6	0.6	-99.1708	19.2922	2.4	2.1	-99.1569	19.4263
0.6	0.6	-99.1829	19.5005	2.6	1.7	-99.068	19.3
0.6	0.6	-99.0847	19.3398	2.6	2.2	-99.1011	19.3091
0.6	0.6	-99.1772	19.3885	2.6	2.2	-99.1481	19.4253
0.6	0.6	-99.2032	19.3428	2.7	2	-99.122	19.381
0.6	0.6	-99.19	19.4253	2.7	2.6	-99.119	19.425
0.6	0.6	-99.1772	19.3885	2.7	2.2	-99.1318	19.3899
0.7	0.6	-99.0839	19.4385	2.8	2.5	-99.1225	19.4539
0.7	0.7	-99.19	19.4253	2.8	2.6	-99.145	19.4097
0.8	0.8	-99.146	19.344	2.8	2.4	-99.0433	19.3461
0.8	0.8	-99.1797	19.4747	2.8	2.1	-99.1253	19.3811
0.9	0.9	-99.133	19.31	2.9	2.4	-99.144	19.411
0.9	0.9	-99.1681	19.3832	2.9	2.6	-99.1047	19.4653
0.9	0.9	-99.182	19.4383	2.9	2.8	-99.1301	19.4251
0.9	0.8	-99.1775	19.4017	2.9	2.9	-99.1037	19.2938
1	1	-99.135	19.33	2.9	2.7	-99.1047	19.3967
1	1	-99.111	19.339	3	2.3	-99.103	19.383
1	0.9	-99.1539	19.358	3	2.7	-99.0433	19.3461
1	1	-99.1439	19.3322	3.1	2.5	-99.1253	19.3811
1.1	1.1	-99.131	19.329	3.2	2.9	-99.125	19.4053
1.1	1.1	-99.1116	19.335	3.2	3	-99.128	19.4359
1.1	1.1	-99.1272	19.313	3.2	3.1	-99.1183	19.4258
1.2	1	-99.118	19.31	3.2	2.9	-99.096	19.372
1.2	1.1	-99.1272	19.313	3.3	2.9	-99.1353	19.4198
1.3	0.9	-99.113	19.32	3.4	3.3	-99.1024	19.2711
1.3	1.1	-99.126	19.329	3.6	3.3	-99.095	19.382
1.3	1.3	-99.1275	19.4931	3.6	3.2	-99.1068	19.3809
1.4	1.2	-99.1483	19.3753	3.6	2.9	-99.096	19.372
1.4	1.2	-99.1253	19.2834	3.7	3.3	-99.0697	19.3927
1.4	1.2	-99.1297	19.345	3.7	2.7	-99.1111	19.4186
1.5	1.3	-99.1253	19.2834	3.8	3.7	-99.1024	19.2711
1.5	1.5	-99.1297	19.345	4	3.4	-99.0963	19.4312
1.5	1.2	-99.1654	19.4337	4	3.7	-99.076	19.4808
1.5	1.3	-99.1254	19.33	4.1	3.7	-99.069	19.38
1.5	1.1	-99.1654	19.4337	4.1	3.8	-99.0876	19.4192
1.8	1.4	-99.005	19.3611	4.2	3.8	-99.0537	19.3858
1.9	1.3	-99.063	19.288	4.5	4	-99.0869	19.3919
1.9	1.7	-99.119	19.363	4.5	4.1	-99.0537	19.3858
1.9	1.6	-99.1059	19.3161	4.5	4	-99.0997	19.4055
2	1.9	-99.1653	19.4186	4.8	4.3	-99.0642	19.4619
2	1.9	-99.1254	19.33	5	4.6	-99	19.4027
2	1.6	-99.147	19.393	5	3.9	-99	19.2786
2.1	1.8	-99.1453	19.4356	5.3	4.8	-99.0584	19.429
2.1	2	-99.1567	19.4097	5.5	4.1	-99.0247	19.4167
2.1	1.7	-99.1425	19.4356				
2.2	2	-99.1566	19.4098				
2.2	1.6	-99.1336	19.45				
2.2	1.7	-99.1566	19.4098				

AGRADECIMIENTOS

Agradezco por el patrocinio para la realización de este trabajo al Comité Asesor del Gobierno del Distrito Federal, así como al Ing. Leonardo Alcántara del IdeI, UNAM, al Ing. Lucio Camarillo y a la Téc. Maricarmen Sánchez del CIRES por las facilidades otorgadas en la obtención de los registros de aceleración, de igual manera un agradecimiento especial a todas las personas que participaron en las campañas de adquisición de datos de vibración ambiental de los últimos años entre ellos a Juan Pacheco, Raúl Mina, Joel Angulo, Julián Zapotitla, Jesús Sánchez, Daniel Peña, Arturo Hernández, Roxana Dinorín y Eloy Mondragón.

REFERENCIAS

- Aguilar, R. (2008), **“Respuesta dinámica de los suelos del valle de México en el futuro”**, Memorias de la XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, Ags. (nov), pp B. 621 - B. 628.
- Avilés J., Pérez-Rocha, L (2010), **“Regional subsidence of Mexico City and its effects on seismic response”**, Soil Dyn Earthquake Eng, No. 30, pp 981-989.
- Espinoza, L. (2011), **“Mediciones de microtremores para estimar el origen del agrietamiento en la delegación Iztapalapa, D.F., México”**, Tesis de licenciatura, UNAM, México.
- Lermo, J., Chávez-García, F. (1992), **“Estimación de periodos dominantes y amplificación relativa en zonas faltantes (transición y lago) del D.F.”**, Informe del I. de I., UNAM, al GDF, Proy 1742, noviembre.
- Lermo, J., Chávez-García, F. (1994), **“Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records”**, Soil. Dyn. & Earthq. Eng. 13, pp 413-423.
- Martínez, J. (2011), **“Evaluación de las grietas de la cuenca de México originadas por la morfología de la roca basal usando mediciones de microtremores”**, Tesis de licenciatura, UNAM, Mexico.
- Méndez, E., Juárez, M., Pérez, D., Auvinet, G. (2008), **“Evolución del hundimiento regional en el vallo de México”**, Memorias de la XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, Ags. (nov), pp B. 377 - B. 384.
- Mooser, F. (1990), **“Mapeo de estructuras geológicas someras de la cuenca de México”**, Memorias del Simposio “El subsuelo de la cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones, a cinco años del sismo”, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.
- Nakamura, Y. (1989), **“A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremors on the Ground Surface”**, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 30(1) pp 25-33.
- Ovando, E., Ossa A., Romo M. (2007), **“The sinking of Mexico City: its effect on soil properties and seismic response”**, Soil Dyn Earthquake Eng, No. 27, pp 333-343.
- RCDF (2004), **“Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”**, Administración Pública del Distrito Federal, Jefatura de Gobierno, “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo”, México.