

## **CAPÍTULO I**

### **IMPORTANCIA DEL ESTUDIO**

#### **RESUMEN**

En el presente capítulo, se hace referencia de la importancia del estudio de la interacción suelo-estructura en la capacidad sísmica de los edificios, a través de experiencias catastróficas como lo fueron el sismo de la Ciudad de México en 1985 y el de Caracas en 1967, analizando los tipos de suelo del sector y la influencia que tuvieron sobre las estructuras durante los terremotos.

Además, por no haber información relevante en el Código Ecuatoriano de la Construcción, se hace referencia a las Normas Mexicanas y a las conclusiones que sus investigadores han llegado en base a sus estudios y experiencia, con el propósito de que en un futuro se incorpore algo de la interacción en el C.E.C.

## **1.1 EFECTO DEL SUELO EN EL SISMO DE MÉXICO DE 1985**

A lo largo de los siglos, la acción sísmica y su capacidad destructora han dejado huella y nos alertan de lo que puede suceder en el futuro, pero es aún más atemorizante si consideramos que existe un factor que puede aumentar la catástrofe, este es el suelo donde se asienta la estructura.

El tipo de suelo local puede ser beneficioso, si está en suelo rocoso, o extremadamente perjudicial para la estructura, como se muestra en ciudades como San Francisco (1906); Caracas (1967); Ciudad de México (1985); Leninakan (1988); Loma Prieta, California (1989); en donde las características del suelo aumentaron el daño ocasionado en las edificaciones.

El 19 de Septiembre de 1985 en Michoacán, México, un sismo de intensidad 8.1 en la escala de Richter, causó daño moderado a las zonas aledañas al epicentro, junto a la costa del Pacífico, pero a 350 km. de distancia, en la Ciudad de México el daño fue extenso. Esta es la más grande tragedia que Ciudad de México haya soportado, porque en tan solo unos segundos este sismo cobró la vida de miles de personas, destruyó casas, edificios e instalaciones de vital importancia para el funcionamiento de la Capital, además de causar heridas a un incontable número de ciudadanos.

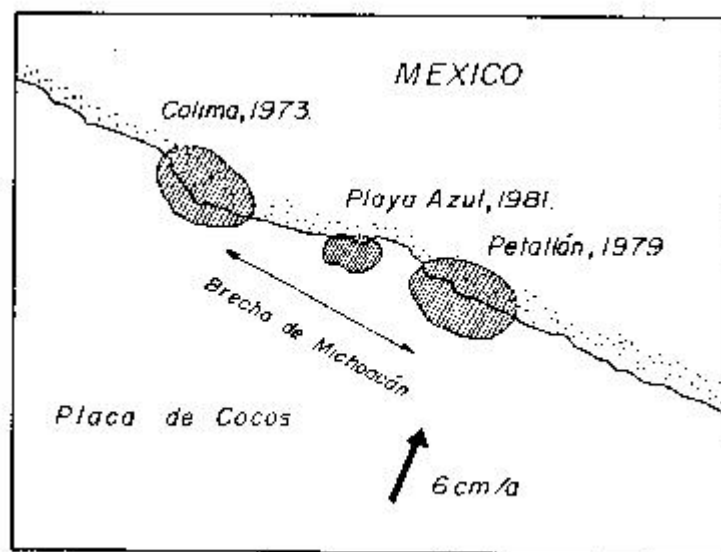
### **1.1.1 Origen del terremoto de México 1985.**

En la zona de subducción que existe a lo largo del Pacífico, el proceso de subducción de la placa de Cocos genera una gran falla geológica que es la fuente de los más grandes y frecuentes sismos de México. La expresión fisiográfica de la falla de subducción es la fosa o trinchera que corre a lo largo de la costa de México y que alcanza localmente profundidades de hasta 5 000 m.

El sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 es uno de estos frecuentes sismos de subducción que tienen lugar en la costa de México. El sismo se originó en lo que se conocía como la brecha de Michoacán. La ausencia de grandes sismos en segmentos de

una falla durante mucho tiempo, indica que debe existir una acumulación importante de energía elástica que crece día a día y tendrá que liberarse tarde o temprano.

La brecha de Michoacán quedaba claramente delineada por las áreas de ruptura de falla de los sismo de Colima de 1973 y de Petatlán en 1979 como se muestra en la figura 1.1. Cabe apuntar que los segmentos de la falla que se deslizan para producir un sismo importante son identificados indirectamente por medio de la localización de las réplicas. Las réplicas, por definición, son sismos de magnitud menor que el sismo al cual prosiguen, y que ocurren sobre el segmento de la falla geológica recién deslizada; las réplicas de un sismo de gran magnitud son más grandes y duran más tiempo que las de un sismo más pequeño. Las réplicas son sismos menores que suelen ocurrir en zonas en donde existe mayor rugosidad e irregularidad, en base de los cuales se libera energía que no fue liberada durante el deslizamiento principal.



**Figura 1.1.** Brecha de Michoacán (Tomada de Internet (1))

La ruptura del sismo de Michoacán se inició cerca del poblado Caleta de campo, al noroeste de Lázaro Cárdenas, Mich. La distribución de las réplicas muestra que el sismo se produjo por el deslizamiento del segmento de la falla que estaba bordeada por los sismos de Colima y Petatlán. Las réplicas finalmente cubren la brecha de Michoacán incluyendo parte de la zona de ruptura durante los sismos de Colima y Petatlán. El sismo del 20 de

septiembre tuvo lugar en el extremo sur del sismo del día anterior, como se muestra en la figura 1.2, lo que hace suponer que la energía elástica acumulada en la falla no se liberó totalmente el 19 de septiembre y un segmento de la falla aún no relajada produjo el segundo terremoto al día siguiente, que fue sentido también muy fuertemente en la ciudad de México.

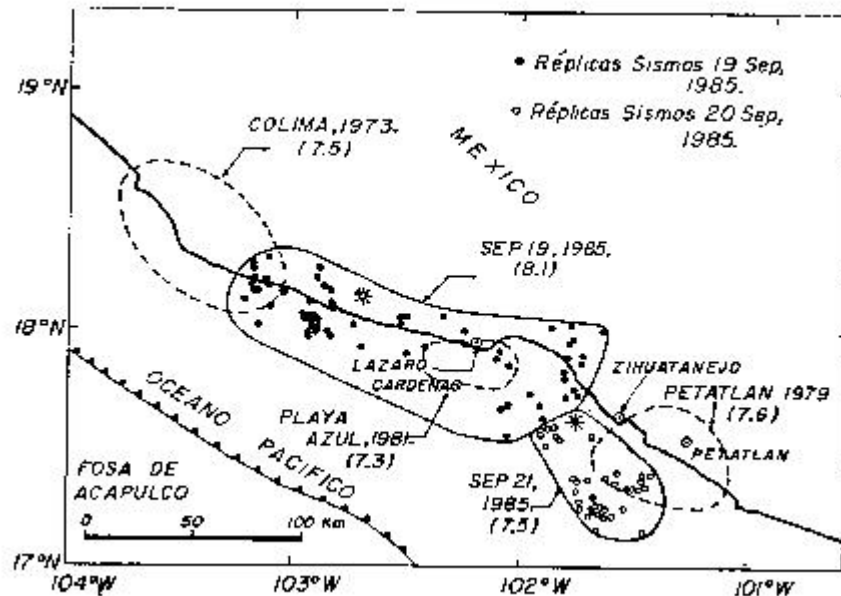


Figura 1.2. Sismo 1985 y sus réplicas (Internet (1))

### 1.1.2 Zonificación del Valle De México

La ciudad de México ha sido edificada sobre los sedimentos pobremente consolidados del lago Texcoco y Xochimilco, drenado por los españoles acorde al avance de su ocupación sobre la región.

Estudios del movimiento del suelo, recopilados en diferentes lugares de la Ciudad de México muestran la significativa relación entre las condiciones del suelo local y sus perjudiciales movimientos, que a su vez han guiado a alcanzar diferentes avances en el entendimiento de la respuesta cíclica de las arcillas plásticas.

Estos estudios la han dividido en tres zonas considerando las características del suelo y las diferencias del subsuelo, como se identifica claramente en la figura 1.3.

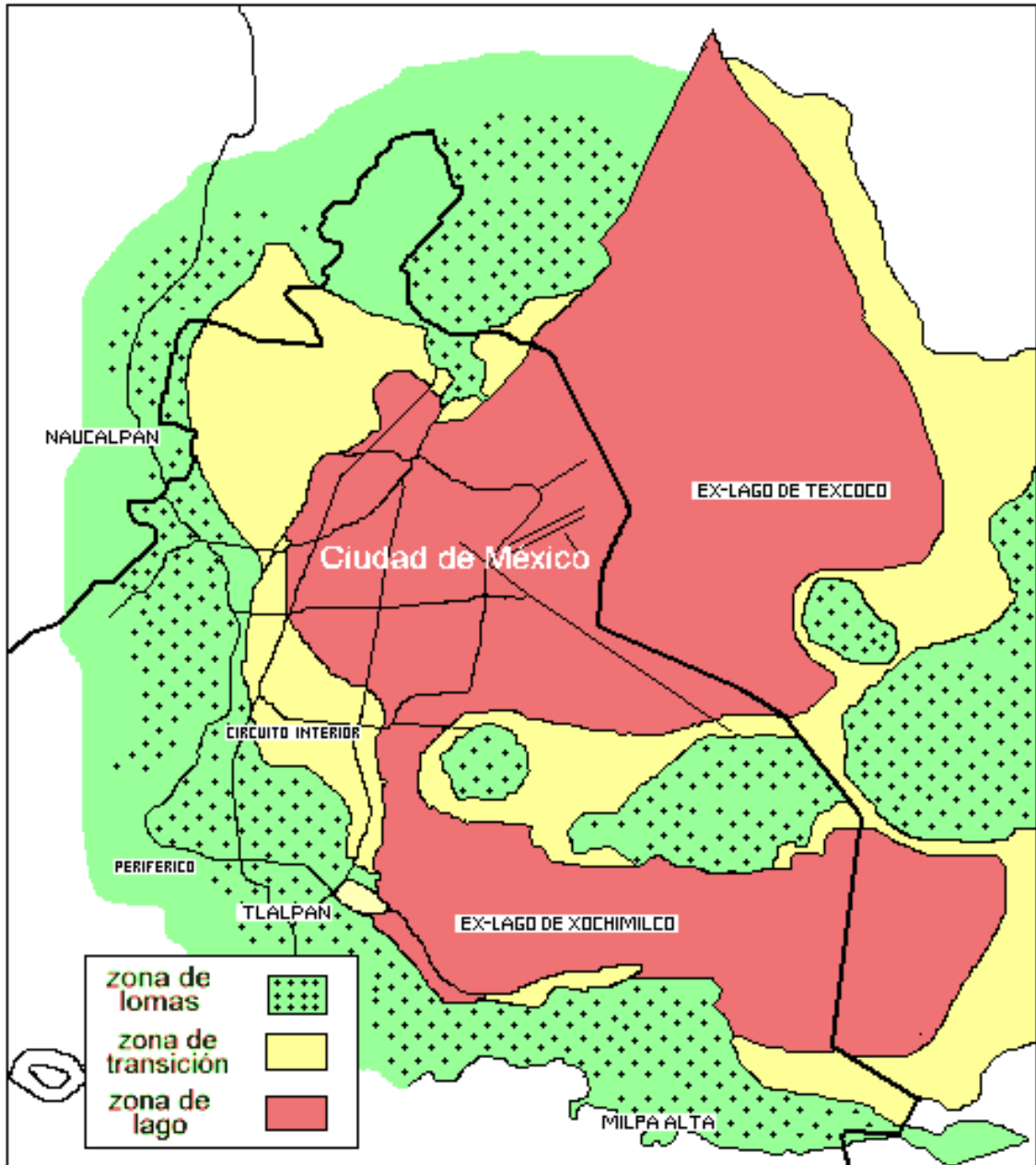


Figura 1.3. Zonificación del Valle de México (Internet (2))

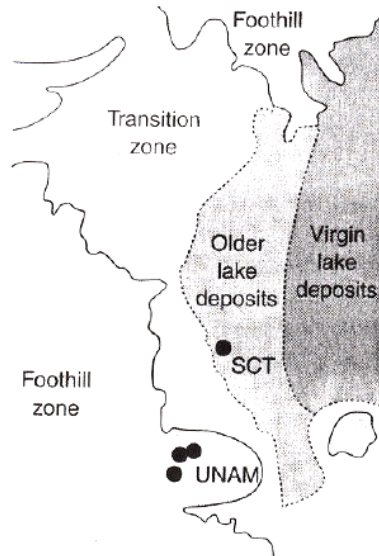
- **Zona I, firme o de Lomas:** Sector más alto de la cuenca del valle. Suelos de alta resistencia y poco compresibles.
- **Zona II o de Transición:** Con características intermedias entre la Zonas I y III.

- **Zona III o de Lago:** Antiguos lagos Texcoco y Xochimilco. El tipo de suelo consiste en depósitos lacustres muy blandos y compresibles con altos contenidos de agua, lo que favorece la amplificación de las ondas sísmicas.

La zona de lomas o zona I está conformada por roca volcánica. En la zona de Lago, una gruesa capa de suelos muy blandos formados de limo, arcilla y ceniza proveniente de los volcanes cercanos a las aguas del antiguo Lago Texcoco se extienden a considerables profundidades. Estos suelos blandos generalmente están conformados por dos capas de arcillas blandas separadas por otra de arena compacta cuyo espesor varía de 0 a 6 m. llamada también “capa dura”. El agua subterránea se halla generalmente a 2 m. de profundidad sobre la mayor parte de la Zona de Lago. Entre la zona de Lomas y la de Lago está la de Transición, donde la capa de depósitos de arcilla blanda es fina e intercalada irregularmente con depósitos aluviales.

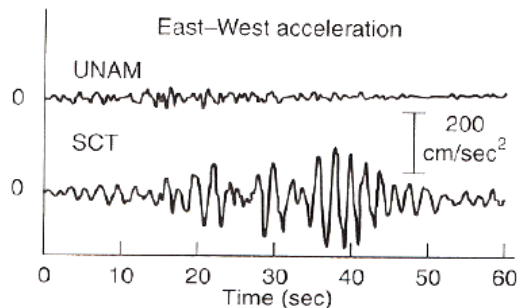
### **1.1.3 Efectos del tipo de suelo en Ciudad de México frente al sismo de 1985**

Antes del sismo de 1985, varios instrumentos de registro sísmico fueron ubicados en la Ciudad de México, como lo indica la figura. 1.4, unos por la UNAM y otros por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). Los de la UNAM fueron situados en la Zona de Lomas a una altura de 3 a 5 m. de la roca basáltica. Los de SCT estaban sobre el suelo blando de la Zona de Lago.



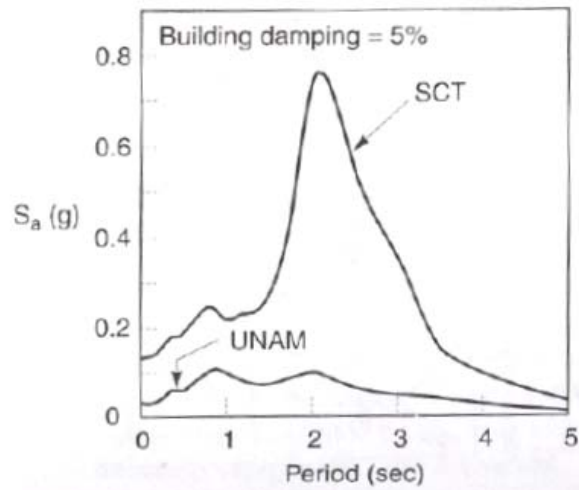
**Figura 1.4.** Localización de Instrumentos de medición sísmica, Stone et al., (1987)

A pesar que el sismo de Michoacán fue de larga duración, la gran distancia de Ciudad de México produjo aceleraciones en el sector de la UNAM de solamente 0.03 g a 0.04 g, como se muestra en la figura 1.5. En la Zona de Transición la aceleración pico fue ligeramente mayor que la anterior, pero todavía es baja. En la Zona de Lago, la aceleración pico fue cinco veces mayor que la de la UNAM. El periodo se conservó alrededor de los 2 sec. Los altos niveles de movimiento se mantuvieron durante un largo periodo. Lo que demuestra que el suelo tiene un papel fundamental en la respuesta sísmica sobre todo si son suelos de baja resistencia.



**Figura 1.5.** Registros de aceleración sísmica recopilados por los instrumentos de la UNAM y SCT, Stone et al., (1987)

El espectro de respuesta de la figura 1.6 ilustra los remarcados efectos del suelo en la Zona de Lago. La aceleración espectral para periodos aproximados a los 2 sec, fueron 10 veces mayores que los registrados en el sector de la UNAM.



**Figura 1.6.** Espectro de respuesta calculado de los registros de la UNAM y SCT, Romo y Seed, (1986)

El sector de la SCT era sucedido por 38 a 50 m. de suelo blando, donde el periodo característico de la zona se estimó en 1.9 a 2.8 sec.

Basándonos en la teoría de que el periodo fundamental de vibración de una estructura es igual a 0.11 veces el número de pisos, las estructuras menores a cinco pisos y los edificios mayores a treinta, sufrieron ligero daño, lo contrario a las que se encontraban en el rango de cinco a veinte pisos que en su mayoría colapsaron o sufrieron gran daño, en la zona central del distrito federal..

Además, la tendencia de las estructuras a aumentar su periodo fundamental de vibración frente a sismos de gran intensidad, debido a la reducción de su rigidez causada por el daño estructural y arquitectónico que se ha acumulado con el paso del tiempo, produce un efecto de doble resonancia (amplificación del movimiento del lecho de roca por los depósitos del suelo más la amplificación del movimiento del suelo por deficiencias de diseño y construcción de la estructura), dando como consecuencia un devastador daño local.



## 1.2 EFECTO DEL SUELO EN EL SISMO CARACAS DE 1967

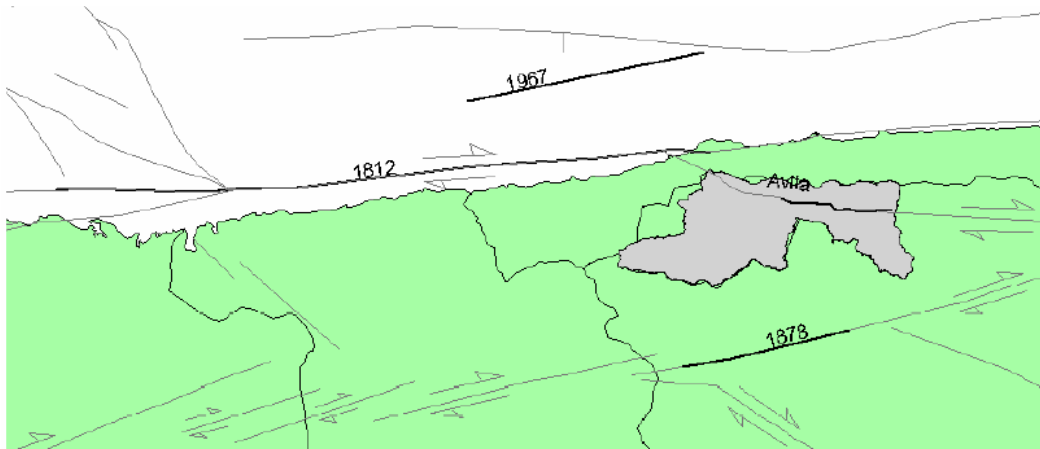
El 29 de Julio de 1967, un sismo de magnitud 6.4 cuyo epicentro fue a 42 km de Caracas, como la figura 1.8 lo indica, azotó esta ciudad y sus alrededores, en el que alrededor de 200 personas perdieron la vida, los daños estructurales se concentraron en el lado oeste de Caracas en el sector de Palos Grandes, donde cuatro edificios de 10 a 12 pisos colapsaron, además, la mayoría de edificios de más de 14 niveles resultaron dañados estructuralmente. El perjuicio en estructuras de menor altura fue menor.

### 1.2.1. Origen del sismo de Caracas 1967

Cerca del 80% de la población de Venezuela se ha asentado en regiones sísmicamente activas, donde se han generado terremotos destructores inclusive en tiempos recientes. Este evento, golpe-deslizamiento, tuvo origen en la orientación este-oeste en el plano de falla, reflejado en el movimiento relativo entre la Placa del Caribe y la Sudamericana, indicados en la figura 1.7. y 1.8, a una tasa estimada en el orden de los 20 a 30 mm/año. Así, el borde principal entre las placas del Caribe y Sur Americana, es la zona a lo largo de la cuales se libera sísmicamente la mayor parte de la energía de deformación producto de la interacción entre ambas.



Figura 1.7. Esquema de límites de placas para Venezuela (Internet (3))



**Figura 1.8.** Localización de Fallas en los sismos de 1812, 1878, 1967, Caracas, Venezuela (Internet (4))

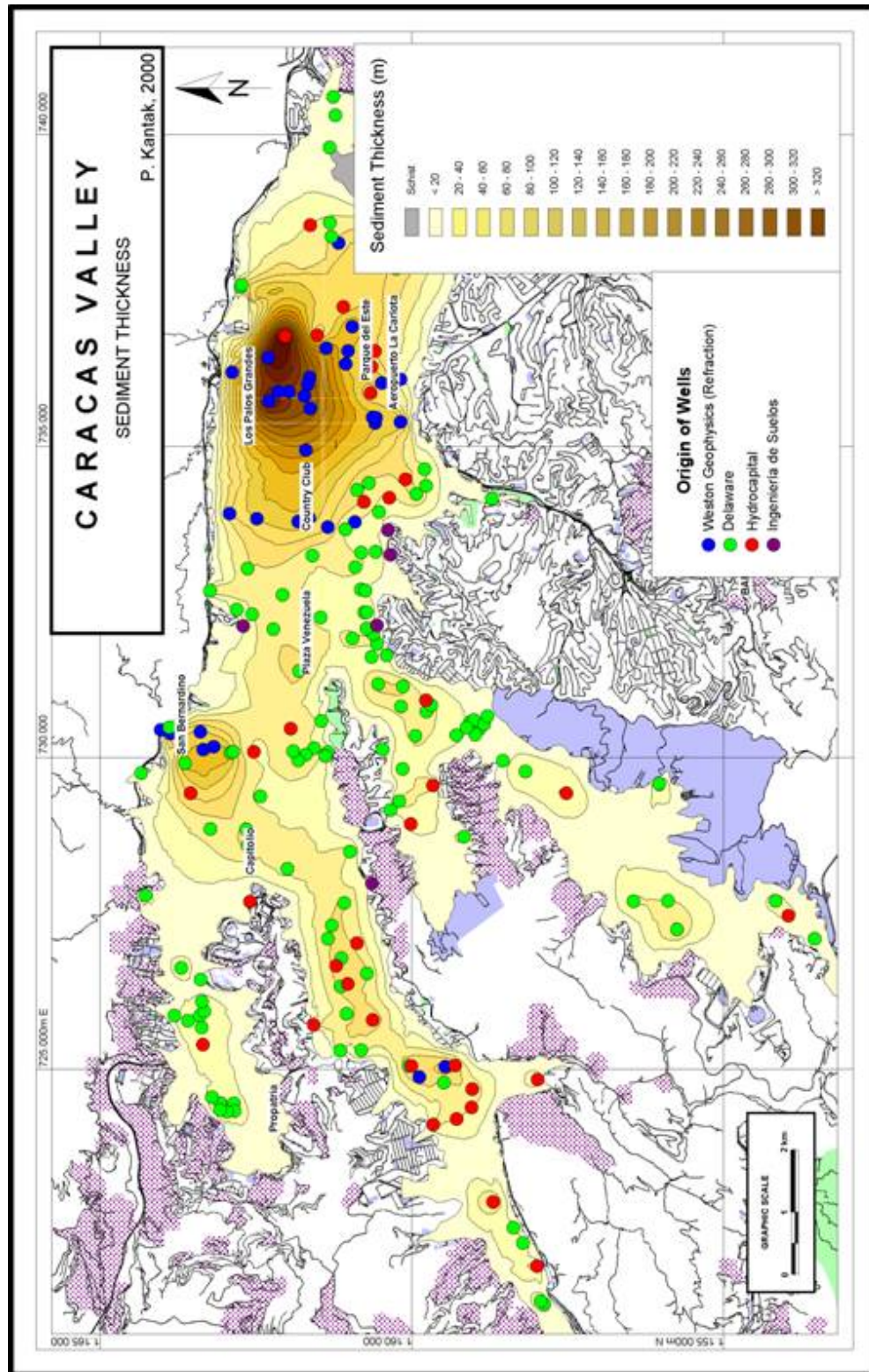
### 1.2.2 Tipo de suelo del valle de caracas

A través de la historia de Venezuela, sismos de desastrosas magnitudes son recordados a través de su historia, empezando con el de Cumaná en 1530, a partir del cual, otros ocurrieron periódicamente en los años de 1641, 1812, 1894, 1900, 1929, 1967 y 1997. El caso del Valle de Caracas es de particular interés, pues por su ubicación en la cadena montañosa de la Cordillera de la Costa, las condiciones tectónicas y de suelo local incrementan la vulnerabilidad de la ciudad.

Varios estudios, posteriores al sismo de 1967, se han llevado a cabo con la finalidad de identificar las zonas de mayor vulnerabilidad sísmica en Caracas. Durante la construcción del metro de Caracas en 1976 se estudió el tipo de suelo en el que la Capital se asienta, como la figura 1.9 lo indica. La correlación entre el tipo de suelo y la vulnerabilidad sísmica de la zona fue desarrollada considerando la litología, el tamaño de las partículas, su color, resultados de ensayos SPT y otras características especiales como la presencia de materia orgánica, la relación roca y roca meteorizada entre otros.

Las características geológicas encontradas, permiten dividir al valle en tres grupos: Abanico de depósitos aluviales que a su vez se subdivide en próximo y distante, planicie empantanada y depósitos aterrazados

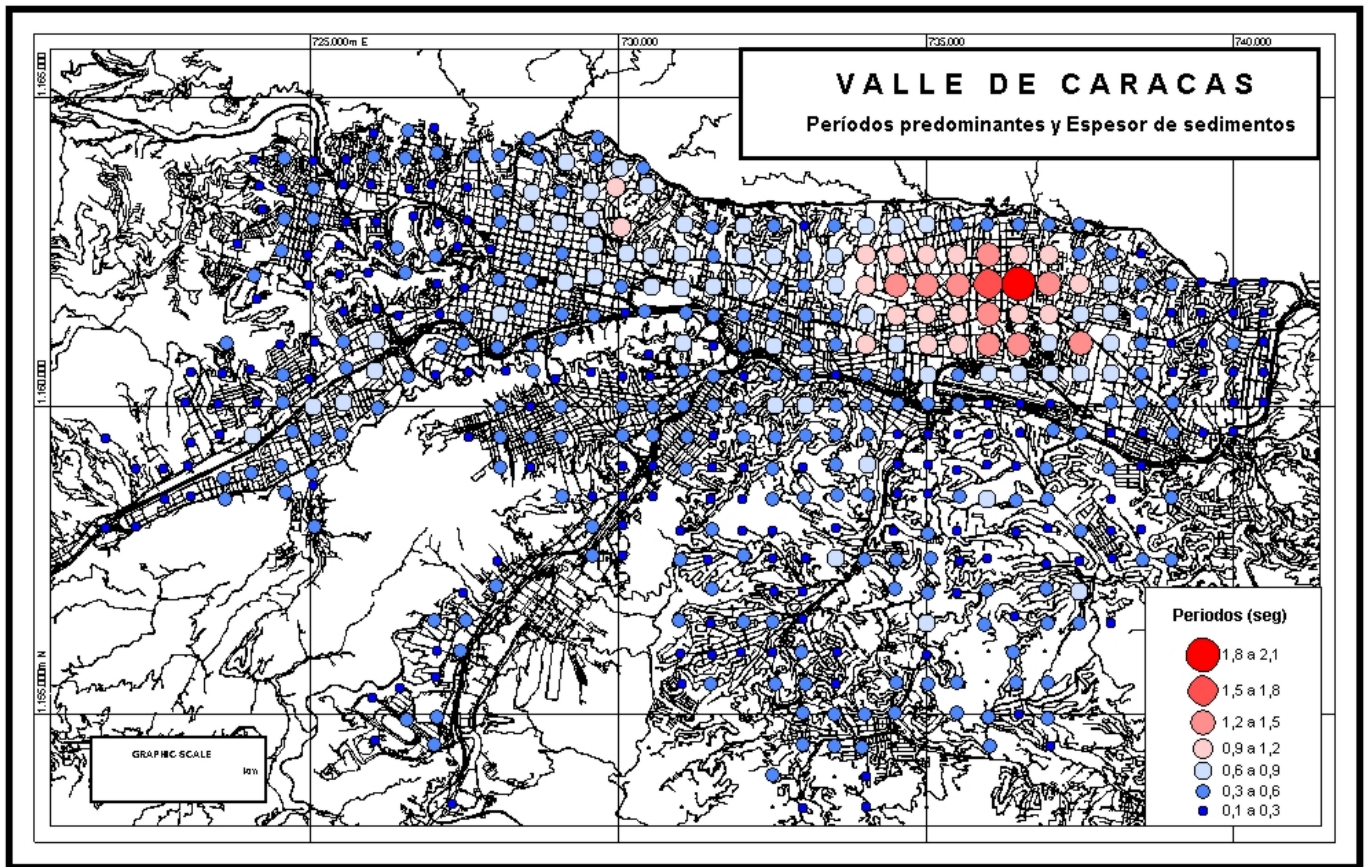
- **Abanico de depósitos aluviales:** Depósitos esencialmente transportados como flujo de desechos y barro desde el macizo de Ávila en el norte hacia el valle, durante deslaves. El espesor de la capa varía de entre 1 y 5 metros. La zona próxima fue depositada sobre el norte del valle, en las áreas del Capitolio, Los Palos Grandes, Altamira y parque del Este en el que predominan canales llenos de sedimentos arenosos con grandes cantidades de fragmentos de grava angulares y subangulares en una matriz arenosa a demás de algunas rocas de gran tamaño. Las arcillas y los limos juegan un papel secundario. Más al sur está la zona distante, ubicada sobre las áreas de Bellas Artes, Chacaito y Chacao, en donde los materiales cambian, el tamaño de las partículas es más fino, dominado principalmente por las arenas y con presencia de arcillas y limos mayor que en la zona próxima, pero aún sin importancia.
- **Planicie empantanada:** Su espesor varía entre 9 y varios cientos de metros. Depositada por el río Guaire y sus tributarios a lo largo del área sur del Valle de Caracas, donde el río corren de este a oeste. Aquí podemos observar terrazas de grava en matriz arenosa depositadas cuando el río ocupó las respectivas elevaciones. Intercalado con dichas terrazas, existen depósitos en los predominan las capas de arena y arcilla con pocas cantidades de arena y libres de fragmentos de roca o grava y en algunas ocasiones con material orgánico.
- **Depósitos aterrizados:** Ubicado de este a oeste, rodeando la cuenca del Valle donde los depósitos de los sedimentos aluviales decrecen rápidamente y las rocas meteorizadas son expuestas o cubiertas por tan solo varios metros de sedimentos (0-5 m).



**Figura 1.9.** Mapa de espesores de sedimentos en el Valle de Caracas  
Kantak P. et al, (2002)

### 1.2.3 Periodos predominantes del suelo

Un grupo de investigadores Venezolanos, mediante la medición del ruido ambiental y utilizando el método de Nakamura o relación H/V para obtener los valores de los períodos predominantes de suelo, concluyen que los valores de períodos predominantes obtenidos a partir de la relación H/V varían entre 0,1 y 2,1 seg. Los mayores períodos fundamentales se encuentran asociados a los sitios en donde la profundidad de sedimentos es mayor, tal es el caso de San Bernardino (150 m), los cuales oscilan entre 0.8 seg., y 1.1 seg., al igual que Los Palos Grandes (340 m), con valores que van de 0.8 seg. a 2.1 seg, claramente indicado en la figura 1.10.



**Figura 1.10.** Mapa de períodos predominantes del suelo  
Rocabado V et al., (2002)

Estudios detallados de la distribución de los edificios afectados acorde a diferentes rangos de altura, la profundidad y las características dinámicas de los suelos en toda el área

y la respuesta de los depósitos de suelo durante el sismo a demás de la evidencia empírica y analítica indican que el daño de las zonas más afectadas debe atribuírsele a la desfavorable combinación de las condiciones del suelo y las características constructivas de las edificaciones, que recayó en la dura respuesta que los edificios tuvieron frente al sismo.

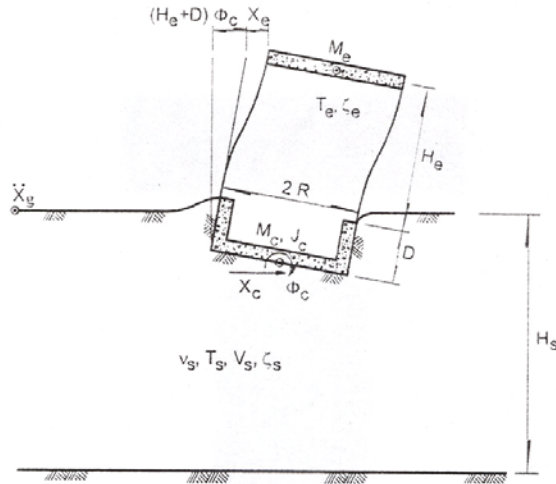
### **1.3 EL CEC 2000 Y LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA**

El Código Ecuatoriano de la Construcción, en el Capítulo 12, referente al diseño estructural, para revestir cualquier evento sísmico considera entre varios factores de cálculo la zona sísmica donde se implantará la estructura, la geología del suelo local, y hace una acotación en el artículo 6.11.2.4 en el que dice “ Para estructuras localizadas en el perfil de suelo tipo S4, se debe tomar en cuenta la posible amplificación de la respuesta de la estructura, debido a los efectos de interacción suelo-estructura”, pero no hace referencia relevante a la importancia de la interacción suelo-estructura, por lo que citaremos a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México y las conclusiones basadas en sus largos estudios y basta experiencia en el tema.

Existen dos tipo de interacciones, la inercial (considera que la excitación sísmica en la base de la estructura es igual al movimiento del suelo en ausencia de la estructura) y la cinemática (considera la diferencia entre el movimiento del campo libre y la excitación efectiva de la base), pero la utilización de solamente el modelo inercial, considerando los efectos de sitio en la determinación del movimiento de campo libre, resulta un procedimiento más conservador, razón por la que los mexicanos la utilizan dentro de sus Normas. Los efectos de la interacción cinemática son menos importantes y solo reducen la resistencia del sistema para estratos someros.

#### **1.3.1 Modelo investigado**

El modelo que se utilizó para definir las propiedades de la interacción suelo-estructura para el desarrollo de las Normas mexicanas fue el de una estructura con varios grados de libertad actuando como un oscilador elemental, el que debe tener igual resonancia que la estructura de base flexible, con el dispositivo de suelo estratificado actuando como manto homogéneo, indicado en la figura 1.11.



**Figura 1.11.** Modelo para considerar los efectos de la interacción suelo-estructura en el modo fundamental de vibración (Avilés J., 2002)

La interacción cinemática se considera restringiendo la posibilidad de reducción del amortiguamiento al 5%.

### 1.3.2 Efectos del periodo y el amortiguamiento en la interacción suelo-estructura

Los puntos que se exponen a continuación deberán tomarse en cuenta en un futuro código de la construcción.

- Como primer punto es importante recalcar que el alargamiento del período es proporcional a la flexibilidad del suelo.
- El amortiguamiento, depende de la capacidad del suelo para disipar energía por comportamiento histerético (amortiguamiento del material), por radiación de ondas (amortiguamiento geométrico), y por desviación de ondas incidentes debido a la cimentación.
- El cabeceo de la cimentación puede aumentar la respuesta relativa del edificio y disminuir el amortiguamiento, pero existe la posibilidad de que el amortiguamiento suelo-estructura sea menor al amortiguamiento de la estructura sola a menos que el cabeceo adicional de la estructura sea compensado con el amortiguamiento del suelo.

- Como consecuencia en el cortante basal de la estructura se dice que el valor de diseño puede ser mayor o menor que el correspondiente a la condición de base rígida, dependiendo de la combinación de los parámetros críticos involucrados como son la relación entre los periodos de la estructura y el sitio, la esbeltez de la estructura, el enterramiento de la cimentación y la profundidad del estrato.
- A pesar que el trabajo hasta ahora realizado en la Ciudad de México es valioso para el desarrollo de las Normas Sísmicas, todavía existen factores que no se han tomado en cuenta, como la asimetría de los edificios, la interacción entre estructuras adyacentes y la influencia de la flexibilidad de la cimentación.