



(Texto de la Conferencia presentada en el Seminario
Internacional de Microzonificación y de Seguridad de Sistemas de Servicios Públicos
Vitales, Realizado en Lima-Perú, del 23 de Agosto al 7 de Setiembre de 1990)

**MICROZONIFICACION EN BASE A CRITERIOS GEOTECNICOS,
ESTIMACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS Y ANALISIS DE
RESPUESTA LOCAL DE LOS SUELOS DEL AREA METROPOLITANA DE SAN
SALVADOR (AMSS).**

**Por: Rolando Alberto Aguilar Colato
Asesor Estructuralista, Ministerio de Educación**

1. INTRODUCCION

En el siguiente documento se presentan una serie de criterios de orden geotécnico desde el punto de vista geológico mecánico y dinámico, con el objeto de establecer un modelo de microzonificación que incluya las condiciones locales de los suelos del Area Metropolitana de San Salvador (AMSS).

En primer lugar se explican las características y objetivos de una microzonificación y la información necesaria para poder implementar estudios de ésta índole en El Salvador.

Posteriormente, se estudian los aspectos geológicos regionales de Centro América, así como los aspectos locales del AMSS; también se tratan los aspectos sísmicos del área; con el propósito de clarificar el contexto general sísmo-geológico en que se encuentra ubicada el área de estudio.

A continuación se presenta la investigación geotécnica del AMSS, que se divide en dos partes; la primera, presenta los aspectos generales del AMSS, así como de algunos elementos teóricos que se utilizaron para el procesamiento de la información geotécnica; la segunda parte es más específica, ya que se centra en la estimación de las propiedades dinámicas de los suelos.

Toda la información anterior se utiliza para realizar un ensayo de microzonificación del AMSS, en forma de mapa con zonas definidas y características geotécnicas de cada uno de ellos.

El modelo de microzonificación anterior se utilizó para hacer un análisis de respuesta local que permitirá conocer el comportamiento del suelo ante un sismo para las zonas establecidas; para ello se aplica un modelo teórico de dinámica de suelos, en donde se analizó el efecto de un sismo en particular (Terremoto del 19 de Junio de 1982) y donde se comprueba las variaciones que las condiciones del suelo introducen en dicho sismo.

Finalmente se presentan algunas conclusiones y recomendaciones sobre el presente tema

2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE MICROZONIFICACION SISMICA

Una microzonificación sísmica comprende el estudio de las condiciones locales pertinentes y la evaluación de la influencia de éstas en las características de los sismos de un sitio dado. Tales características son de gran importancia en el diseño sísmico de obras civiles y dependen de varios factores que están asociados con tres aspectos

- a) Mecanismo generador del temblor
- b) Trayectoria de las ondas sísmicas
- c) Condiciones geológicas del terreno

El primer aspecto, es uno de los que menos se ha estudiado en nuestro país, entre los factores asociados a la fuente sísmica que influyen en las características del movimiento del terreno están. La cantidad de energía liberada, características geométricas del mecanismo, esfuerzos desarrollados en el foco, etc. Dicha influencia puede consistir en modificar el movimiento en sí, del sitio de estudio, independientemente de las condiciones geológicas del terreno, así como en la generación de diversos tipos de ondas sísmicas, las cuales son modificadas por el suelo local en diversas formas

La influencia de la trayectoria de las ondas sísmicas radica en disminuir la amplitud de las ondas; fenómeno conocido como atenuación y que ha sido estudiado por medio de la observación de registros sísmicos. Entre las expresiones de atenuación propuestas por investigadores en otros países, actualmente se encuentran las siguientes: Housner, (1965), Kanai (1966), Shanabel y Seed (1973) y otros.

En cuanto a las condiciones geológicas del terreno y en el cual se enmarca el presente trabajo, se ha demostrado su influencia en forma incidente en las fallas catastróficas del suelo ante acciones sísmicas como por ejemplo, En Anchorage, Alaska (1964); Nigata, Japón (1964), Caracas, Venezuela (1967), San Fernando, Estados Unidos (1971), México (1985) y otros. Además aunque los depósitos de suelo sean sísmicamente estables, éstos pueden actuar como amplificadores de la intensidad de las ondas sísmicas

2.1 IMPORTANCIA DE UNA MICROZONIFICACION SISMICA

Se podrá apreciar que la realización de una microzonificación sísmica es una tarea compleja y que debe ser tomada como un proyecto de investigación de interés nacional. A la vez, esta investigación permitirá cuantificar el riesgo sísmico que existe en la región, que se traducirá en reglamentos y normas de construcción apegados a la realidad sísmica del país

Cabe destacar, que muchos estudios de microzonificación sísmica realizados en diversas ciudades como Skopje, Managua, Caracas y otras, han sido motivados por los daños catastróficos de terremotos severos, es decir se realizaron "a posteriori". Lo anterior indica la forma usual de proceder en algunos países, las sociedades dedican más tiempo a la atención a sus problemas cotidianos (económicos, políticos, etc.) y solo si se sufre una catástrofe ocasionada por un evento sísmico, se le dedica una atención adecuada al problema, aunque a veces en forma transitoria

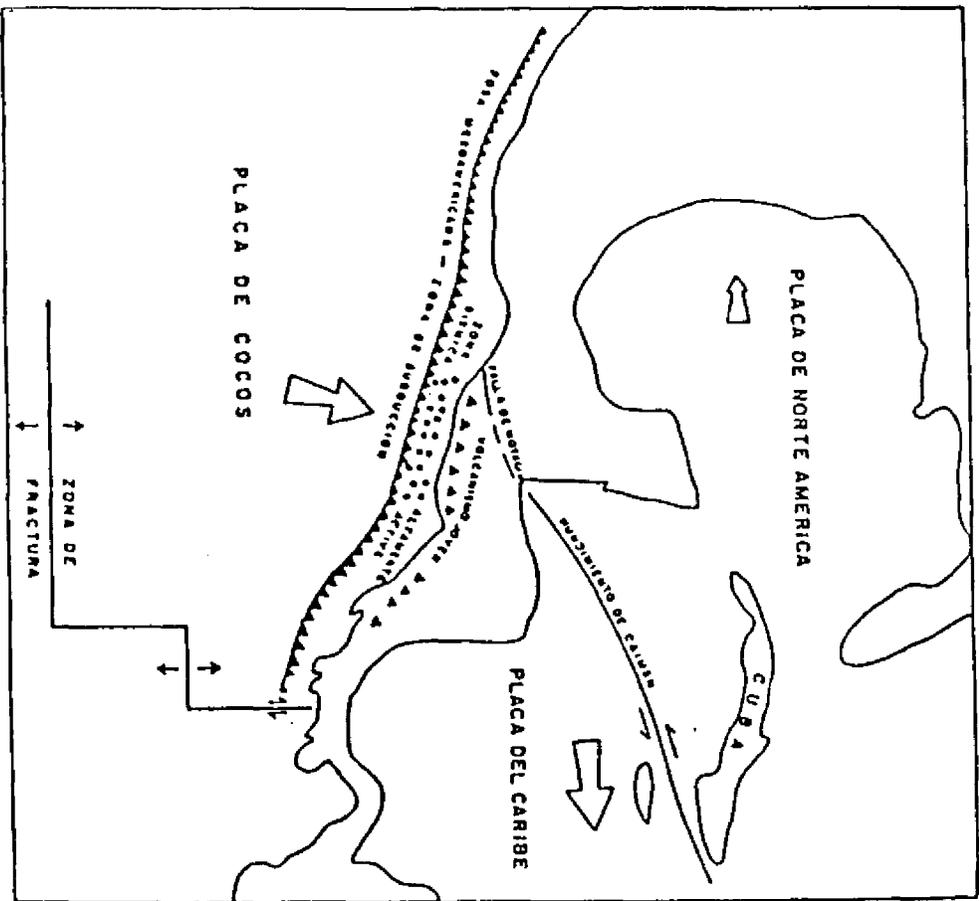


FIG. N.º 1 PANORAMA TECTONICO REGIONAL
 (TOMADO DE: S. J. ALVAREZ, "INFORME TECNICO SOBRE ASPECTOS SISMOLOGICOS DEL TERREMOTO EN SAN SALVADOR, DEL 18 DE JUNIO DE 1982", MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS, CIG, DEPTO DE SISMOLOGIA, 1982)

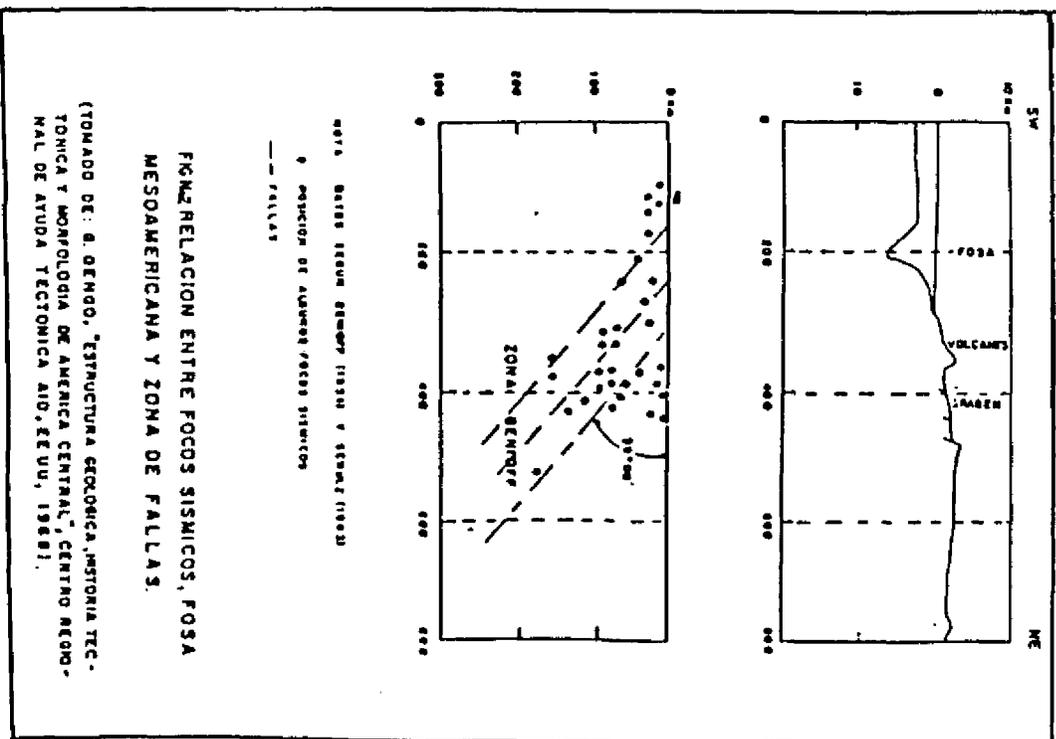


FIG. N.º 2 RELACION ENTRE FOCOS SISMICOS, FOSEA MESOAMERICANA Y ZONA DE FALLAS.
 (TOMADO DE: G. ORENDO, "ESTRUCTURA GEOLOGICA, HISTORIA TECTONICA Y MORFOLOGIA DE AMERICA CENTRAL", CENTRO REGIONAL DE AYUDA TECNICA AID, ECUVU, 1983).

Resulta entonces necesario que todas las entidades relacionadas con este problema, tomen conciencia de promover estudios sísmicos como parte de un programa de investigación continua y no como esfuerzos reactivos de ayuda técnica a una población que ha sufrido un terremoto.

2.2 METODOLOGIA DE MICROZONIFICACION SISMICA PARA EL AMSS

No se pretende, en este apartado, establecer las pautas rigurosas para un proyecto de microzonificación sísmica, sino dar a conocer algunos aspectos que deben ser considerados.

Dentro de las áreas generales de investigación que no deben faltar se tienen las siguientes:

- a) Investigación Geotécnica
- b) Investigación Sismológica.

Dichas investigaciones requieren de una participación interdisciplinaria. La investigación geotécnica comprenderá aspectos topográficos, geológicos, estratigráficos y dinámicos del valle de San Salvador.

El análisis de estas variables permitirá definir zonas de estudio específicas que permitirán la zonificación de la ciudad.

En cuanto a la investigación sismológica, se requerirán, entre otras cosas, del análisis de registros sísmicos desde varios puntos de vista.

La combinación de éstas dos áreas generales de investigación conllevará a una evaluación del riesgo sísmico en una forma realista, ya que considera las condiciones locales del fenómeno y en acciones sísmicas obtenidas.

El presente trabajo, está dirigido específicamente al área de la investigación geotécnica del AMSS; que permitirá el establecimiento de una microzonificación sísmica del área.

3. GEOLOGIA Y SISMICIDAD DE LA CIUDAD DE SAN SALVADOR

Antes de abordar lo relacionado a las características geológicas y de sismicidad del AMSS es importante analizar el marco geológico regional y poder comprender mejor todo el panorama sismogénico de la región; por tanto se procederá a realizar un breve análisis al respecto.

3.1 GEOLOGIA REGIONAL

3.1.1 Panorama Tectónico Regional

Es conocido que la región de América Central y el Caribe se encuentran en una de las zonas sísmicamente más activa de la tierra; esta actividad sísmica y tectónica es ocasionada por la interacción de las tres placas siguientes: Placa del Caribe, Placa Americana y Placa de Cocos (ver fig. N°1)

La placa del Caribe, en la cual El Salvador se encuentra localizada, es bordeado en el Oeste por la Fosa Mesoamericana; al Norte por la Fosa del Caymán; al Este por el área de las Indias Occidentales y al Sur por una región sísmica de América del Sur.

De los elementos tectónicos antes mencionados, los más importantes para El Salvador es la Fosa Mesoamericana, la cual corre paralela a las costas del Pacífico.

3.1.2 Marco Geológico Regional de Centroamérica.

La estructura geológica regional de América Central presenta dos provincias diferentes, una septentrional y otra meridional 2/; sin embargo, contiene una zona cuya historia geológica es común, más joven y es paralela a la costa del Océano Pacífico. Brevemente se definirán lo que comprenden estas dos provincias.

América Central Septentrional está comprendida entre América del Norte y la parte central de Nicaragua, y está soportada por una corteza de tipo continental, compuesta de rocas cristalinas (metamórficas e ígneas) originados durante principios o a mediados de la Era Paleozoica. América Meridional, por otra parte, abarca desde la porción Sur de Nicaragua hasta las tierras bajas de Colombia; presenta una corteza de espesor intermedio del lado de Caribe, similar a la Cuenca Marina de Colombia, y una corteza más delgada, probablemente de tipo oceánico perteneciente a la Era Mesozoica.

3.1.3 Zonas Sísmicas Regionales

La definición de zonas sísmicas en el área de Centro América ha sido posible gracias a estudios de carácter observativo realizados por diversos investigadores 3/ 4/.

R. Shulz, llegó a establecer la existencia de cuatro áreas sísmicas diferentes, de las cuales las tres primeras forman la zona de Benioff, que se extiende desde la llamada Fosa "Middle American Trench", con buzamiento hacia el Este hasta la costa salvadoreña; la cuarta zona corre paralela a la cadena de volcanes jóvenes, ya dentro del territorio nacional. Shulz dividió la zona de Benioff en tres, de acuerdo a la profundidad focal de los sismos registrados, lo cual se aprecia en la Fig. N°2 y la Tabla N°1.

La mayoría de sismos percibidos en el país pertenecen a la zona A, con sismos de intensidad entre 4 y 5 grados según la escala Mercalli-Sieberg; no obstante, algunas veces se han registrado intensidades de 8 a 9 grados.

La cuarta zona, relacionada a la Cadena Volcánica joven, se caracteriza por ser de focos someros (10 Km. aprox) y sus sismos afectan grandemente a las principales ciudades centroamericanas.

3.1.4 Condiciones Tectónicas de El Salvador

Según Durr, existen dentro de El Salvador tres principales sistemas tectónicos que corren en direcciones WNW, NNW y NNE 5/.

De éstos el más importante es el primero, y éste es el sistema básico para la formulación de las diferentes unidades morfológico-geológicas del país.

En cuanto al sistema WNW, son notables sus desplazamientos verticales que se observa a lo largo de esta dirección en todo el país, su actividad originó formas de tensión como por ejemplo, fosas tectónicas, llamadas también Graben.

3.2 GEOLOGIA LOCAL

Los estudios geológicos realizados en esta área (Fig. N°4), han demostrado que todas las rocas que en ella se encuentran pertenecen a la categoría de volcánicas, con edades geológicas que oscilan entre el Terciario y el Cuaternario. Los materiales geológicos que predominan y que por lo tanto cubren casi todo San Salvador, pertenecen a la llamada "Formación de San Salvador", y los principales materiales geológicos que la componen son los siguientes:

- a) Materiales redepositados o retrabajados bajo la influencia del agua
- b) Cenizas volcánicas, conocidos bajo la denominación de "Tierra Blanca".
- c) Estratos de pómez, que han dado lugar a la formación de las tobas color café.
- d) Corrientes de lava andesíticas y basálticas.

Estos aparecen ubicados en orden cronológico, comenzando con el más reciente, hasta terminar con el más antiguo.

Los materiales redepositados o retrabajados consisten en una mezcla de finos y gruesos, en la que predominan cenizas volcánicas (limos arenosos o arenas limosas), y en realidad se trata de sedimentos aluviales que tienen un espesor superior a 20 mts. y presentan una condición de baja estabilidad debido a su escasa consolidación.

La ceniza volcánica o "tierra blanda", fue arrojada a través de una serie de erupciones violentas por el volcán Ilopango (ahora un lago) hace 2,000 años. Se compone de pómez de granulometría fina y composición dacítica. Los mayores espesores se localizan en las cercanías de su fuente de origen, que es el lago de Ilopango, y van disminuyendo a medida que la distancia aumenta; poseen poca estabilidad por su escasa edad geológica.

Los estratos de pómez, o tobas color café, son al igual que la tierra blanca, materiales piroclásticos con alto contenido de SiO₂ su color varía entre café y amarillo, de granulometría fina a gruesa. Su espesor máximo alcanza 25 mts y disminuye a medida que la distancia aumenta de El Boquerón (volcán de San Salvador). Las tobas color café son más estables que la tierra blanca; pero debido a las lluvias éstas pueden erosionar fácilmente.

Las lavas andesíticas y basálticas, que aquí se mencionan, son el producto de actividad eruptiva de El Boquerón y se tratan de dos corrientes de lava que principalmente se encuentran sepultados por materiales piroclásticos arriba mencionados; y su espesor no se conoce con exactitud aún cuando parece que no sobrepasa los 10 mts.

Para una mejor comprensión se puede ver la Fig. N°5

3.3 ASPECTOS TECTONICOS LOCALES

Existen cuatro direcciones principales de la falla E-W NW-SE, y N-S (ver Fig. N°6). La falla en dirección E-W es la más antigua y no prevalece sobre las más jóvenes NW y NE. Aparentemente, las cuatro direcciones son de igual importancia en el AMSS. El terremoto del 10 de Octubre de 1986 fue producto del afallamiento local, así como el movimiento sísmico del 3 de Mayo de 1965.

3.4 SISMICIDAD DE LA CIUDAD DE SAN SALVADOR

Los sismos que afectan la ciudad de San Salvador tienen un origen tectónico como volcánico. Las características de los temblores de San Salvador, dan como resultado los siguientes patrones de sismicidad en la región:

- a) Eventos locales de origen tectónico, asociado al afallamiento local, dentro del cual el sistema de fallas con rumbo aproximado N 60° W constituye el de mayor peligro; causante del terremoto del 3 de Mayo de 1965.
- b) Eventos tectónicos asociados al volcanismo.
- c) Eventos no locales. Este se refiere a movimientos asociados a los desplazamientos en la fosa mesoamericana y todos aquellos relacionados al tectonismo regional.

4. INVESTIGACION GEOTECNICA DEL AMSS

Una de las fuentes de información más importante con que se cuenta en esta investigación geotécnica, la constituyeron los estudios de suelos realizados en el AMSS para fines de Ingeniería Civil. La Fig. N°7, presenta la localización de todas las perforaciones recopiladas para el propósito de este estudio, y éstos están basados en la prueba de penetración Standard (SPT), para la obtención de la estratigrafía, densidad relativa y capacidad de carga del suelo.

Para una investigación de Dinámica de Suelos, un registro detallado obtenido de la SPT, dificulta y hace complejo el análisis de la propagación de ondas a través de la masa del suelo; por lo que se procedió a una simplificación de los registros de penetración Standard bajo dos criterios importantes, a saber:

- a) Simplificación según tipos de suelo.
- b) Simplificación según el valor N (N° golpes de la SPT).

Esta simplificación se logró a través de un programa de computadora cuyo algoritmo se tomó del presupuesto por Y. Ohsaki en su estudio "Major Types of Soils Deposits in Japanese City Areas".

Una simplificación final se logró por la superposición de los dos métodos anteriores (ver Fig. N°8)

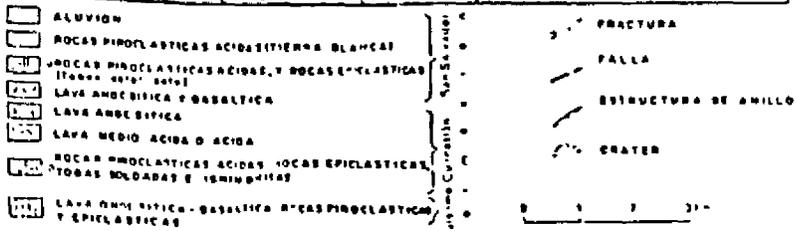
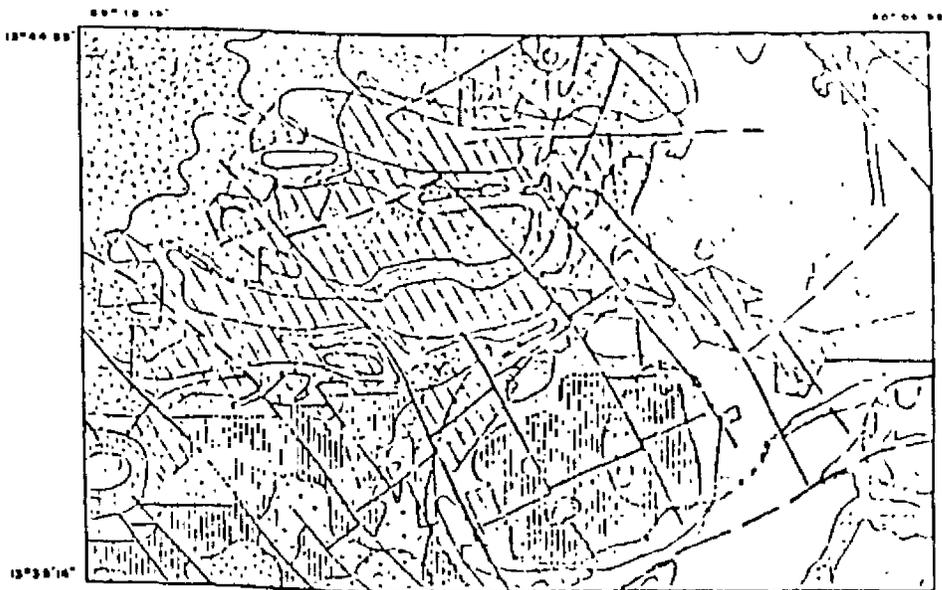
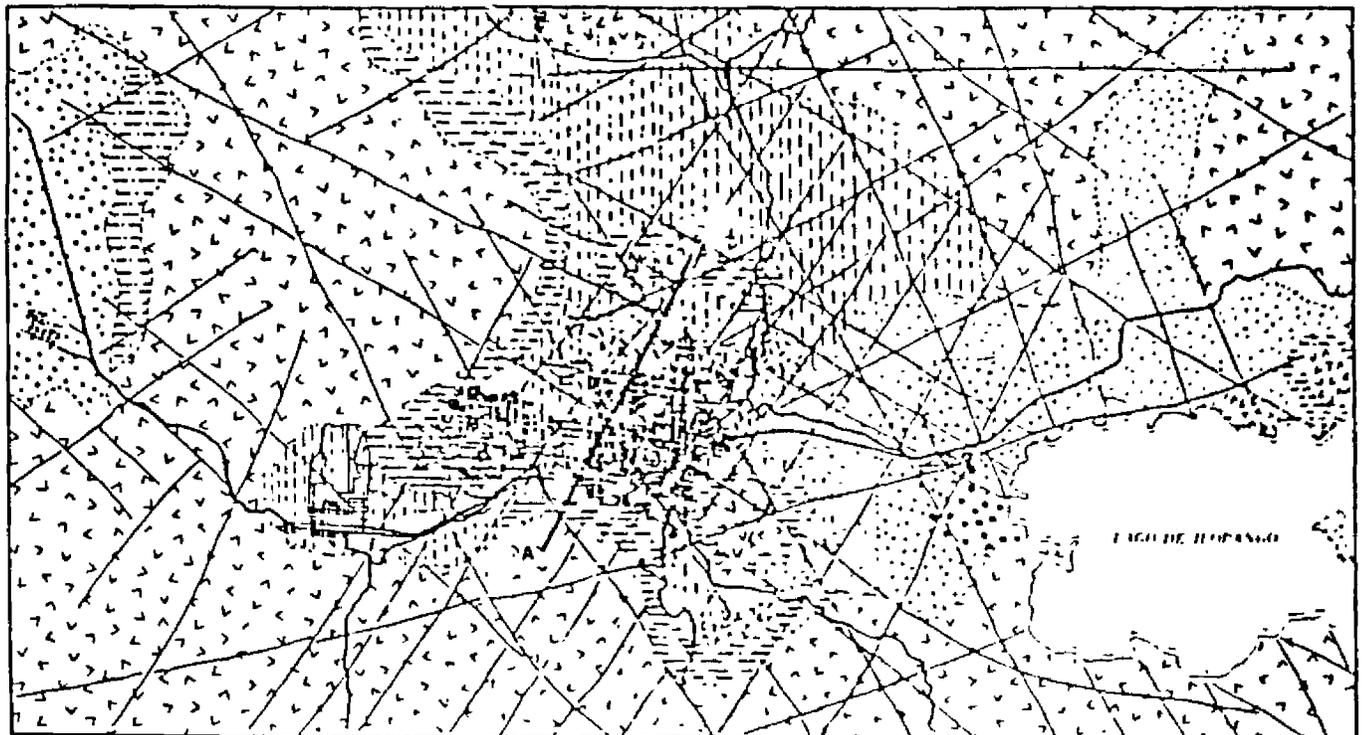


FIG. N.º 5 MAPA GEOLOGICO DEL AREA DE SAN SALVADOR
 (TOMADO DE M. SCHMIDTOWME "THE GEOLOGY OF DE SAN SALVADOR AREA - EL SALVADOR, CENTRAL AMERICA - A BASIS FOR CITY DEVELOPMENT AND PLANNING, GEOLOGISCHES JAHRBUCH, HEFT 9, HEFT 19 1973)



Unidad Litológica	Incremento Aceleración (%)	Espesor (m) Tierra Blanca	Observaciones
1	1.0	0-3	Hacia arriba
2	1.25	3-6	-
3	1.5	6-9	-
4	1.75	9-23	-
5	2.25	0-9	Hacia prof. desconocida (**)
6	2.5	9-25	-
7	3.0	25 ó más	-

El conocimiento del subsuelo del nido como la suma de la litología con los rasgos tectónicos, es uno de muchos factores geológicos y superficiales que pueden contribuir en el aumento de los riesgos, constituye una necesidad en nuestro ambiente de alta sismicidad, para garantizar un planeamiento adecuado de las áreas urbanas.

(*) Este incremento es una simple apreciación de las diferencias de aceleración que, con un mismo punto del terreno difiere por sus características, en comparación con el de samiento al que se asigna "UNO" como factor. (Ver Simbología)

(**) Considero que prima el hecho de que se midan otros materiales como suelos (sólidos y líquidos). (Ver Simbología)

línea del corte geológico
fallas

FIG. N.º 6 AFALLAMIENTO Y ZONIFICACION EN BASE AL ESPESOR DE TIERRA BLANCA SEGUN MAXIMILIANO MARTINEZ.

4.1 ELEMENTOS GEOTECNICOS CONSIDERADOS EN LA INVESTIGACION

En base al análisis de los estudios de suelo recopilados y los geológicos explicados antes, se determinó que los suelos del AMSS son arenas limosas o limos arenosos (SM y ML). No obstante, en la cercanía de los mantos volcánicos se encuentran suelos de características arcillosas (arcillas limosas, arenas arcillosas, etc.). Además, se encuentran flujos de lava y materiales piroclásticos de granos grandes y pueden clasificarse como (GP, GC, SP y SC) principalmente.

4.2 ESTIMACION DE PROPIEDADES DINAMICAS DEL AMSS

La estimación de las propiedades dinámicas se llevó a cabo, a través de una correlación empírica entre resultados de ensayos de prospección geofísica, específicamente ensayos de refracción sísmica, y los valores de N resultado del método de simplificación explicado antes.

Este tipo de correlación también se ha realizado en otros países como Japón, obteniéndose buenos resultados. En este estudio se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla N°2.

Las principales variables que intervinieron en la correlación fueron las siguientes:

- a) Número de golpes de la SPT, N
- b) Contenido de humedad, W
- c) Peso específico del suelo, γ
- d) Velocidad de las ondas longitudinales en el suelo, V_L
- e) Módulo de rigidez del suelo G.

Las correlaciones básicas obtenidas en esta investigación son las siguientes:

$$V_L = 63 N^{0.45} \text{ (m/seg.)} \quad \text{para suelos } N < 100$$

$$V_s = 31 N^{0.45} \text{ (m/seg.)} \quad \text{para suelos } N < 100$$

$$V_s = 41 N^{0.45} \text{ (m/seg.)} \quad \text{para rocas } N > 100$$

A partir de éstas se obtuvieron otras que relacionan el módulo de rigidez del suelo a partir de la siguiente ecuación:

$$G = \rho V_s^2 \quad \text{donde } \rho \text{ es la densidad del suelo}$$

$$G = 209.5 N^{0.9} \text{ (ton/m}^2\text{)} \quad \text{para } N \leq 100$$

$$G = 309 N^{0.9} \text{ (ton/m}^2\text{)} \quad \text{para } N > 100$$

Estas expresiones son representativas para los suelos del AMSS. Cabe aclarar que tanto los valores de peso específico ($\gamma = 1.5 \text{ t/m}^3$) y módulo de Poisson ($\nu = 0.25$) se tomaron como valores promedio para los suelos del AMSS y así obtener las relaciones V_s y G.

Con estas correlaciones se calcularon posteriormente las propiedades dinámicas de los suelos del AMSS para aplicarlo al modelo de microzonificación.

SITIO DE PROSPECCION	PROF. DE CAPA (m)	VELOCIDAD DE ONDA LONGITUDINAL (m/seg)	MODULO DE ELASTICIDAD (ton/m ²)	VELOCIDAD DE ONDA CORTE (m/seg)	MODULO DE RIGIDEZ (TON/m ²)
CANTON EL CARMEN AYUTUXTEPECUE	P ₁ = 6.55	VL ₁ = 213.36	E ₁ = 5801.90	V ₁₁ = 123.33	G ₁ = 1922.60
	P ₂ = 15.24	VL ₂ = 670.56	E ₂ = 60160.49	V ₁₂ = 430.40	G ₂ = 32745.48
ESCALON "A"	P ₁ = 6.10	VL ₁ = 274.32	E ₁ = 11120.73	V ₁₁ = 158.57	G ₁ = 3716.58
	P = 18.29	VL ₂ = 624.84	E ₂ = 95735.99	V ₁₂ = 401.05	G = 39349.50
SAN JOSE DE LA MONTANA	P ₁ = 6.10	VL ₁ = 414.53	E ₁ = 22743.66	V ₁₁ = 253.61	G ₁ = 7608.24
	P ₂ = 16.76	VL ₂ = 487.68	E ₂ = 38861.81	V ₁₂ = 313.02	G ₂ = 13980.68
SAN BENITO	P ₁ = 0.61	VL ₁ = 173.74	E ₁ = 309.93	V ₁₁ = 100.42	G ₁ = 1233.84
	P ₂ = 6.40	VL ₂ = 411.48	E ₂ = 20993.03	V ₁₂ = 264.11	G ₂ = 9398.19
CANTON SAN RAMON	P ₃ = 12.19	VL ₃ = 640.08	E ₃ = 77214.83	V ₁₃ = 410.83	G ₃ = 31829.30
	P ₁ = 6.10	VL ₁ = 265.18	E ₁ = 10391.86	V ₁₁ = 153.28	G = 3472.72
SANTA TECLA "A"	P ₂ = 15.24	VL ₂ = 609.60	E ₂ = 90888.14	V ₁₂ = 381.27	G ₂ = 37433.75
	P ₁ = 4.86	VL ₁ = 188.80	E ₁ = 3238.32	V ₁₁ = 91.62	G ₁ = 10880
PALACIO DE LOS DEPORTES	P ₂ = 7.92	VL ₂ = 363.76	E ₂ = 17035.30	V ₁₂ = 234.78	G ₂ = 7022.46
	P ₃ = 19.29	VL ₃ = 944.88	E ₃ = 218289.32	V ₁₃ = 608.50	G ₃ = 89981.89
PALACIO DE LOS DEPORTES	P ₁ = 0.68	VL ₁ = 396.24	E ₁ = 23328.03	V ₁₁ = 228.04	G ₁ = 7807.40
	P ₂ = 16.25	VL ₂ = 548.64	E ₂ = 50918.59	V ₁₂ = 363.34	G ₂ = 22339.09
PALACIO DE LOS DEPORTES	P ₁ = 0.83	VL ₁ = 406.91	E ₁ = 24601.23	V ₁₁ = 235.20	G ₁ = 8233.01
	P ₂ = 11.99	VL ₂ = 472.44	E ₂ = 37737.09	V ₁₂ = 312.87	G ₂ = 16564.06
PALACIO DE LOS DEPORTES	P ₁ = 1.53	VL ₁ = 335.28	E ₁ = 16702.22	V ₁₁ = 193.60	G ₁ = 5589.74
	P ₂ = 16.64	VL ₂ = 437.20	E ₂ = 35339.98	V ₁₂ = 302.78	G ₂ = 15312.92
PALACIO DE LOS DEPORTES	P ₁ = 2.41	VL ₁ = 343.51	E ₁ = 17532.47	V ₁₁ = 198.36	G ₁ = 6861.89
	P ₂ = 18.20	VL ₂ = 472.44	E ₂ = 37737.09	V ₁₂ = 312.87	G ₂ = 16584.06

TABLA N. 2 RESULTADO DE PROSPECCIONES SISMICAS EN EL AMSS

4.1.2 Variación del Valor "N" de la SPT en el Area

El valor N permite determinar el estado de compacidad de los suelos friccionantes y la consistencia de los suelos plásticos. Los valores obtenidos en las diversas perforaciones, se determinó que los suelos de la región pueden agruparse en tres categorías:

- a) $N < 10$; suelos superficiales "muy sueltos" o "blandos".
- b) $10 < N < 50$; suelos entre "semi-duros" y "compacto" o entre "semi-rígidos" y "rígidos".
- c) $N \geq 50$; suelos "muy compactos".

Para esta clasificación se utilizan una serie de perfiles estratigráficos elaborados a partir del valor N, y se construyeron diez perfiles diseminados en toda el AMSS (Fig. N°9) y la (Fig. N°10) que es un ejemplo de dichos perfiles.

4.1.3 Propiedades Mecánicas Pertinentes

Para definir el comportamiento del suelo ante cargas producidas por efectos sísmicos o por estructuras que se apoyen en él, se hace necesario determinar una serie de propiedades ingenieriles, que conlleva a un intenso trabajo de campo y laboratorio. A continuación se ofrece un listado de las propiedades más importantes que se consideraron y que podrían influir en el comportamiento sísmico de los depósitos del suelo:

- a) Compacidad y consistencia
- b) Densidad (Tabla N°3)
- c) Cohesión aparente
- d) Espesores de tierra blanca (Fig. N°11)
- e) Tipos de estratificación
- f) Características morfológicas
- g) Profundidad del estrato rocoso
- h) Agua subterránea

5. ENSAYO DE MICROZONIFICACION EN BASE A CRITERIOS GEOTECNICOS

En esta etapa del estudio se realizó una transposición de las diferentes características geotécnicas del AMSS explicados en los apartados anteriores y se definieron zonas con propiedades similares dentro del AMSS; el presente ensayo tiene un carácter preliminar ya que en alguna medida se tuvieron limitaciones en la información obtenida.

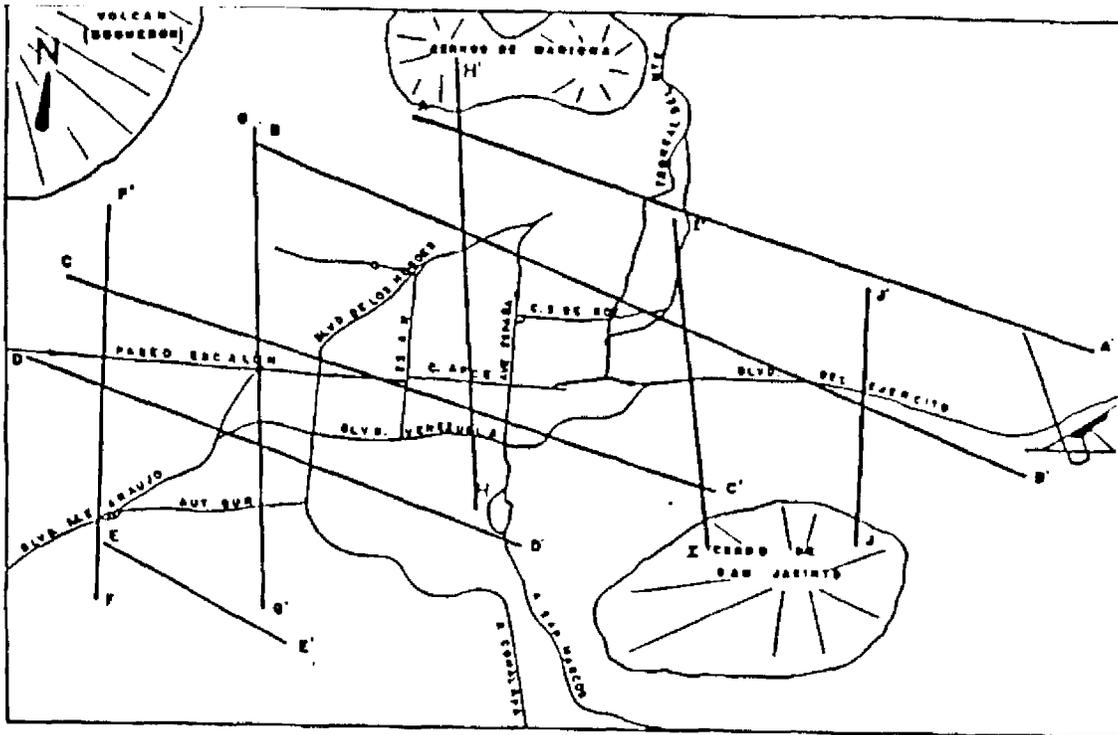


FIG. N. 9 INDICE GENERAL DE PERFILES.

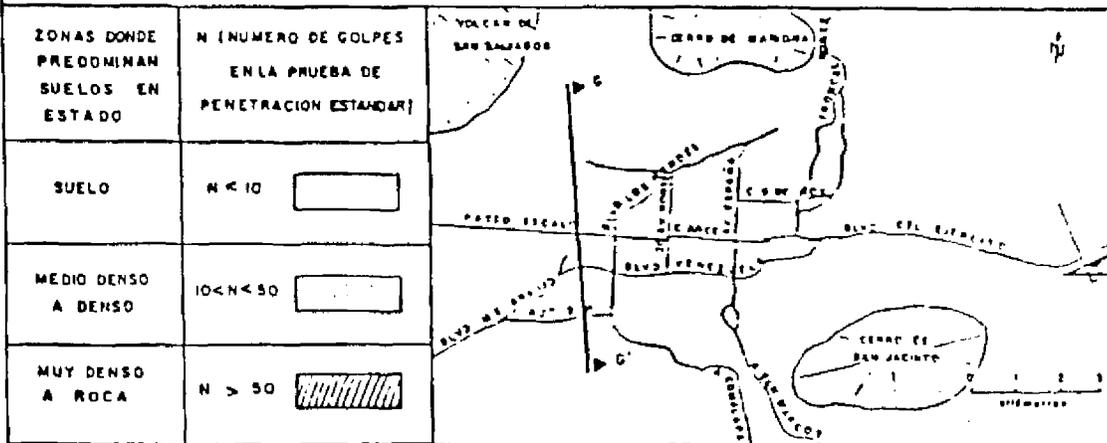
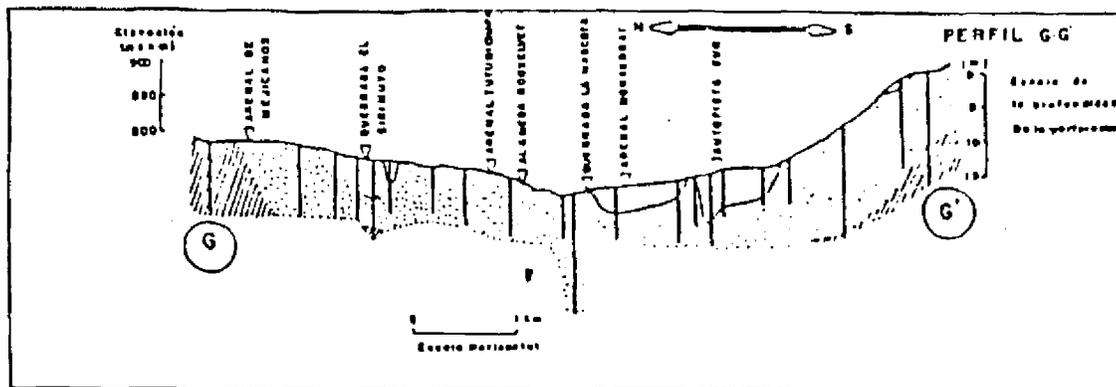


FIG. N. 10 PERFIL ESTADISTICO DE ACUERDO AL VALOR "N" (G-G)

5.1 GRADO DE IMPORTANCIA DE LAS VARIABLES GEOTECNICAS ANALIZADAS

Se mencionan en orden las variables analizadas:

- a) Espesores de "Tierra Blanca"
- b) Condiciones geomorfológicas y tipos de estratificación
- c) El tipo de suelo y su secuencia estratigráfica; profundidad del estrato rocoso.
- d) El valor N de la SPT y propiedades mecánicas y dinámicas.

5.2 PRINCIPALES CARACTERISTICAS ZONALES

Las zonas establecidas se pueden apreciar en la Fig. 12 y que constituye el mapa de microzonificación. La Tabla N°4 representa los perfiles estratigráficos representativos del subsuelo del AMSS y sus principales características y la Tabla N°5, muestra algunos aspectos cualitativos de las zonas.

6. ANALISIS DINAMICO DE LOS SUELOS

En esta sección se presentan los resultados del análisis de la respuesta local del terreno, cuando éste se ve afectado por un movimiento sísmico. El procedimiento general aplicado también es una adaptación del programa codificado por Y. Ohsaky, en su reporte "Dynamics Characteristics and One-Dimensional Amplification Theory of Soils Deposits", y consiste básicamente en la aplicación de la teoría unidimensional considerando que las ondas de corte se propagan verticalmente hacia arriba, utilizando para el análisis la transformada de Fourier. Se usaron también funciones de transferencia que representaban el efecto modificador del suelo sobre las características del temblor (Función de Amplificación del Suelo).

Una explicación esquemática del método se aprecia en la Fig. N°13.

El objetivo del análisis es, primordialmente, detectar cualquier modificación que el suelo pueda introducir en los movimientos sísmicos. Para esto, se tomaron los modelos zonales del numeral anterior; se escogió el evento sísmico del 19 de Junio de 1982. Los resultados llegan a cuantificar el efecto del suelo; pero no debe olvidarse que éstos son específicos del sismo estudiado.

Un aspecto relevante en este apartado lo constituyen las funciones de transferencia (Fig. N°14), ya que ésta es un espectro que define el efecto amplificador del suelo; puede verse que el primer modo o modo fundamental es el de mayor importancia en las amplificaciones, se obtuvieron dichas funciones para cada modelo zonal, encontrándose diferencias notables entre ellos, relacionadas con variaciones en las características de los suelos.

En las tablas N°4 y N°5, se encuentran resultados del análisis, la primera contiene las frecuencias y periodos de vibración de cada zona y la segunda los valores de aceleración obtenidos.

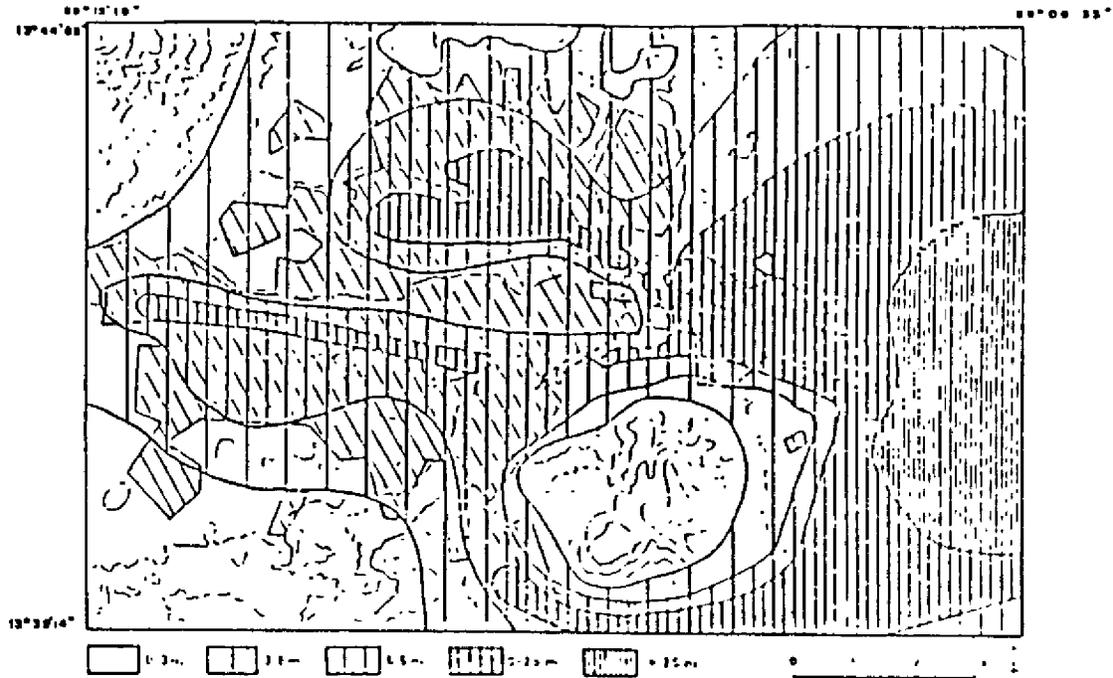
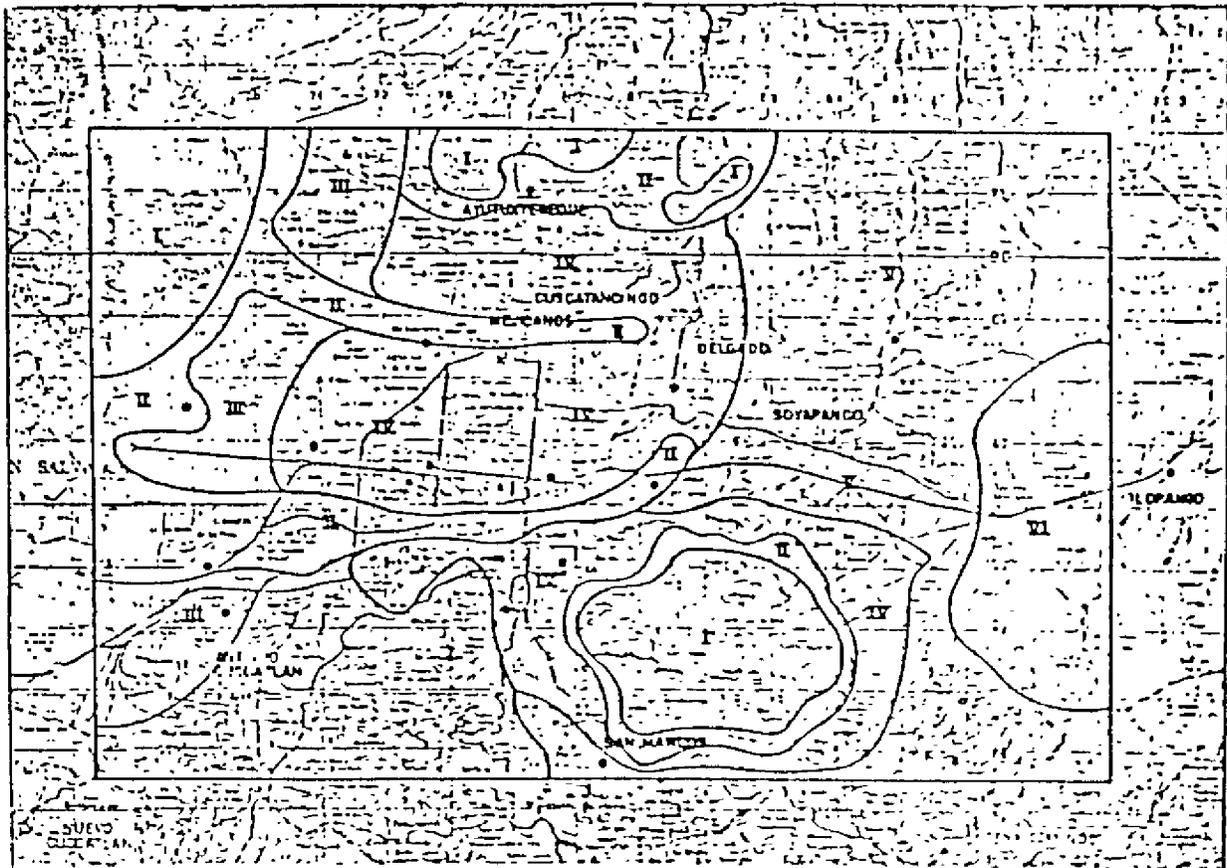


FIG. N. 11 ESPEORES DE TIERRA BLANCA (en m)

(TOMADO DE: M SCHMIDT-THOME, "THE GEOLOGY OF THE SAN SALVADOR AREA- EL SALVADOR, CENTRAL AMERICA- A BASIS FOR CITY DEVELOPMENT AND PLANNING", GEDOLOGISCHES JAHRBUCH, REIHE B, HEFT 13, 1975)



• SISMOSCOPIO

FIG. N. 12 ZONIFICACION DEL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR

TABLA N.4 PERFILES ESTATIGRAFICOS REPRESENTATIVOS DEL SUBSUELO DEL A.M.S.S.

ZONA	CAPA	PROFUNDIDAD EN M.	PESO VOLUMETRICO ESP. 1/00 ³	VELOCIDAD DE PENETRACION W. 0.0. M./S.	INDICE DE COMPRESIBILIDAD INICIAL
	1) Material Orgánico (Sapindi-Cl)	0-1	1.31	76	772
I	2) Sesto Arcilloso	1-4	1.37	173	4429
	Semiarenosa con arena	4-8	1.89	430	37360
	1) Limo Arcilloso con arena	0-8	1.54	159	2842
II	2) Arena Limosa con granillo	8-95	1.60	224	8359
	Semiarenosa con arena	95-110	1.88	430	37380
	1) Limo Arcilloso con arena	0-11	1.57	174	4232
	2) Arena Arcillosa con arena	11-12	1.57	181	4380
III	3) Arena Limosa con arena	12-30	1.66	280	13440
	Semiarenosa con arena	30-110	2.13	534	61960
	1) Arena Limosa con arena	0-10	1.65	171	4320
	2) Arena Limosa con arena	10-25	1.49	203	6390
IV	3) Arena Limosa con arena	25-35	1.82	242	9681
	Semiarenosa con arena	35-110	2.20	585	79620
	1) Arena Limosa con arena	0-15	1.53	152	3607
	2) Arena Limosa con arena	15-30	1.81	234	6996
V	3) Arena Limosa con arena	30-48	1.70	260	13600
	4) Arena Limosa con arena	48-65	1.80	328	19400
	Semiarenosa con arena	65-110	2.28	585	79620

NOTA: El coeficiente de compresibilidad es el cociente entre el peso específico del suelo en estado líquido (1.000 g/cm³) y el peso específico del suelo en estado sólido (1.000 g/cm³). El coeficiente de compresibilidad es el cociente entre el peso específico del suelo en estado líquido (1.000 g/cm³) y el peso específico del suelo en estado sólido (1.000 g/cm³).

El coeficiente de compresibilidad es el cociente entre el peso específico del suelo en estado líquido (1.000 g/cm³) y el peso específico del suelo en estado sólido (1.000 g/cm³).

ZONA	CLASIFICACION GEOLOGICA	CLASIFICACION DEL SUCS	ESTRATIGRAFIA Y MORFOLOGIA
I	Sedimentos finos, fuertemente retrabajados (arcillas y arenas finas producto de rocas volcánicas).	Arcilla arenosa, de baja a media plasticidad, café, (CL)	Estratigrafía decorada. Zona de avanzadas abruptas (elevación > 900 msnm)
II	Conito volcánico fino a grueso, granos angulosos, poca retrabajada (con limos arcillosos) y horizontales de "lapilli".	Limo arenoso, café claro, arenas (ML); arena limosa o arena gruesa (SM, SP).	Estratigrafía decorada Morfología Ondulante
III	Conito volcánico fino a grueso, granos angulosos, poca retrabajada (arena).	Limo arenoso, café claro (ML); arena limosa o arena limosa con granos (SM, SP).	Estratigrafía decorada Pendientes moderadas que en la zona anterior
IV	Conito volcánico fino a grueso granos angulosos (de mar) todo diferencial entre las partes finas y gruesas.	Limo arenoso, café claro (ML); arena limosa o arena limosa (SM, SP), estratos mezclados	Estratigrafía regular con estratos bien definidos Morfología plana
V	Conito volcánico medio a grueso, granos angulosos, poca retrabajada.	arena limosa principalmente, color café claro (SM)	Estratigrafía regular con estratos bien definidos Morfología plana
VI	Conito volcánico medio grueso, granos angulosos, poca retrabajada.	arena limosa, principalmente color café claro (SM)	Estratigrafía regular con estratos bien definidos Morfología plana

TABLA N.5 ASPECTOS CUALITATIVOS DE LAS ZONAS DEFINIDAS EN EL A.M.S.S.

TABLA N°1 DIVISION DE LA SISMICIDAD EN LA ZONA DE BENIOFF

ZONA	DIST/ DE LA COSTA	PRDF/FOCAL
A	0 - 30 Km.	70 - 150 Km.
B	60 Km.	50 Km.
C	120 Km.	30 Km.

TABLA N°3 DENSIDADES DE LA "TIERRA BLANCA" EN EL AMSS

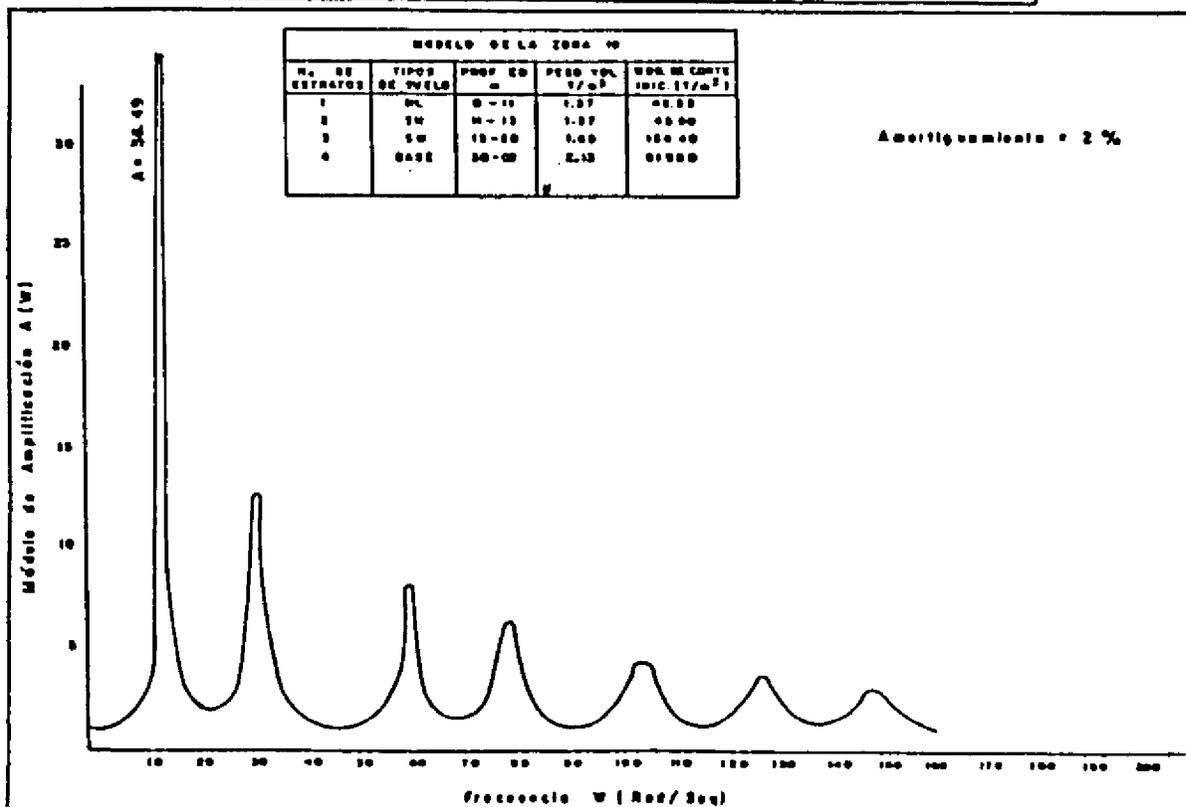
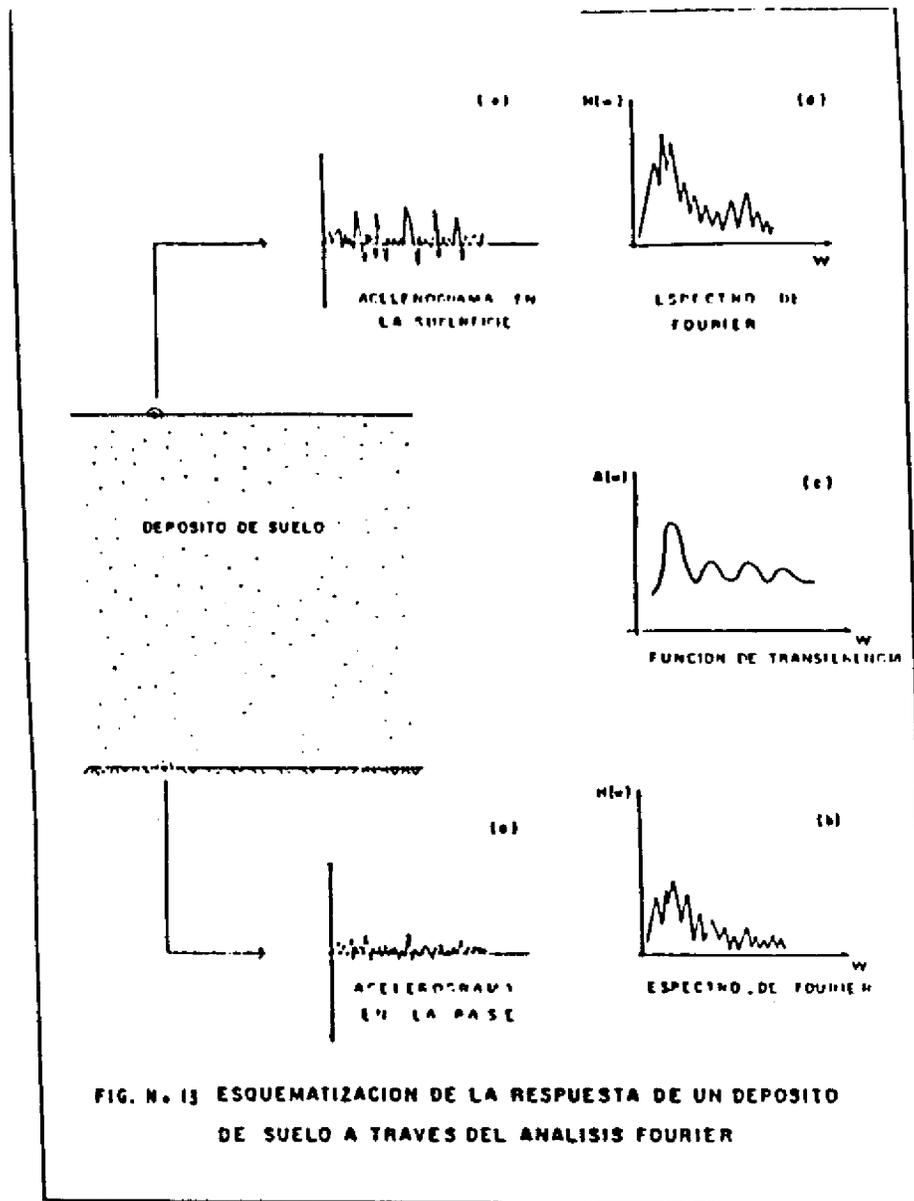
SUELO	DENSIDAD HUMEDA "IN SITU" en Ton/m ³	DENSIDAD SECA "IN SITU" en Ton/m ³	HUMEDAD (%)	"N" (Gol.)
Con pómez	1.3-1.5	1.2-1.4	10-25	1-100
Sin pómez	1.5-1.7	1.3-1.5	15-25	1-100

TABLA N°4 FRECUENCIA Y PERIODOS NATURALES DE VIBRACION DE LOS DEPOSITOS DE SUELO QUE DEFINEN LOS MODELOS ZONALES 6/.

ZONA	PRDF. DE LA ROCA	F (rad/seg)	F (Hertz)	T (seg.)
I	4.0	66.27	10.54	0.095
II	9.5	30.37	4.83	0.206
III	30.0	14.42	2.29	0.436
IV	35.0	10.12	1.61	0.620
V	65.0	7.06	1.12	0.890
VI	65.0	7.06	1.12	0.890

TABLA N°5 VALORES DE ACELERACION OBTENIDOS DEL ANALISIS DE FOURIER 6/.

ZONA	VALOR DE ACEL. MEDIA (gals.)	VALOR DE ACEL. MAX. (gals.)
I	95.21	288.82
II	84.19	260.83
III	112.21	346.06
IV	112.75	391.59
V	94.08	379.35
Observatorio	--	188.28



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Se comprobó en este estudio la importancia que tiene la respuesta local del suelo ante movimientos sísmicos. La influencia del suelo en el AMSS es debido principalmente al espesor del mismo. Se puede decir que los tipos de suelos, características estratigráficas y geomorfológicas están bien definidos para el AMSS.

El cálculo de las propiedades dinámicas de los suelos a través de métodos geofísicos es una alternativa viable en nuestro país, ya que dichos métodos pueden reducir considerablemente la realización de ensayos de laboratorio.

Finalmente se concluye que el análisis de Fourier en el dominio de las frecuencias resulta de gran utilidad en el proceso de microzonificación sísmica del AMSS, ya que permite obtener analíticamente funciones sísmicas para diversas condiciones locales.

7.2 RECOMENDACIONES

Debe apoyarse la investigación coordinada y dirigida a un objetivo común, cual es, el establecimiento a corto plazo de una microzonificación sísmica del AMSS que involucre todas las variables pertinentes. Tanto el gobierno, universidades y entidades pueden participar en este proceso.

Dentro de las variables de orden geológico local que conviene ampliar la investigación se encuentran las siguiente: definir en varios puntos del AMSS la profundidad del estrato rocoso, dibujar mapas de isolíneas de espesor de suelo, evaluación de peligros geológicos y ampliar la investigación en cuanto al cálculo de las propiedades dinámicas de los suelos tanto por métodos geofísicos como de laboratorio.

REFERENCIAS

1. Sonia Ruíz, "Influencia de las Condiciones Locales en las Características de los Sismos", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1977, pp 2-5.
2. Gabriel Dengo, "Estructura Geológica, Historia Tectónica y Morfológica de América Central", Centro Regional de Ayuda Técnica AID, EE. UU, 1968, p. 7.
3. R. Shultz y R. Weyl, "Sismos y la Estructura de la Corteza Terrestre en la parte Norte de Centro América". Bol. Sismol., Vol, V El Salvador, 1960, pp 36-40
4. R. Shultz, "Estudios sobre la Sismicidad en la Región Centroamericana". Bol. Bibl., Geofísica y Oceanográfica Americana, México, 1963, pp 125-144.
5. Meléndez, B y Fuster, J.M: "Geología", Madrid, Paraninfo, 1966, pp 687
6. Aguilar Rolando, Bendaña José E, Cedillos René A, "Criterios Geotécnicos de Microzonificación y Estimación de Propiedades Dinámicas de los Suelos del Area Metropolitana de San Salvador", Tesis para optar el Grado de Ingeniero Civil, UCA", Dic. 1984.

AGRADECIMIENTOS

Desco expresar mi agradecimiento a tantas personas que colaboraron y apoyaron la realización de este trabajo.

De manera especial, agradezco a las autoridades del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) y demás Instituciones organizadoras, por haber aceptado mi candidatura y permitirme así la presentación de esta investigación.

Quiero agradecer, al Ing. José Antonio Rivas Escobar, por haberme confiado la presentación de este documento.

Agradezco también a la Sra. Licenciada Cecilia Gallardo De Cano, Viceministro de Educación, por haber apoyado mi candidatura para participar en tan importante Seminario, así como al Licenciado Oscar Antonio Sandoval, Director General de Educación.

A la Empresa Rodríguez Meléndez y Compañía, Ingenieros Arquitectos, por todo el respaldo que me brindaron y sin el cual no hubiera sido posible mi participación

A mis apreciables amigos Ing. José Ernesto Bendaña e Ing. René Antonio Cedillos por sus recomendaciones y consejos que me fueron de tanta utilidad

A mis padres Gilberto y Lillian por todas sus gestiones oportunas y a mi esposa Quidia Janeth por toda su comprensión y apoyo.

Rolando Alberto Aguilar Colato

**Seminario Internacional de Microzonificación y de Seguridad
de Sistemas de Servicios Públicos Vitales, realizado en Lima-
Perú, del 23 de Agosto al 7 de Setiembre de 1990**

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

RESUMEN

Durante 2 semanas se reunieron profesionales de países latinoamericanos y del Japón de diversas profesiones (Ingenieros Civiles, Arquitectos, Geofísicos, Geólogos) que a nivel de investigación científica, enseñanza universitaria, planificación y administración estatal y en la práctica profesional adelantan actividades relacionadas con la reducción del riesgo de desastres naturales, particularmente terremotos. El Seminario se centró en los aspectos de la microzonificación de amenazas y vulnerabilidad en áreas urbanas y en la protección de servicios públicos vitales; su objetivo principal fué la actualización de conocimientos y técnicas y la información sobre el estado de avance de estas actividades en países latinoamericanos.

Entre las conclusiones y recomendaciones del grupo de participantes se destacan aquellas relativas al gran potencial actual para predecir efectos de terremotos, muy estrechamente determinadas por la calidad de los suelos, a las dificultades para implementar en la práctica del desarrollo urbano los resultados que han logrado los técnico, a la fundamental importancia de los sistemas de servicios públicos vitales, tanto en la prevención de desastres como en el objetivo de la orientación del desarrollo urbano, a la falta de comunicación entre quienes adelantan actividades científicas y técnicas en este campo en Latinoamérica y la necesidad de participación e integración de los diversos sectores, técnico, planificador, político-administrativo y económico en la realización de los objetivos que conducen a la protección contra fenómenos naturales peligrosos, que tanto han traumatizado el avance socio-económico en muchos países de América Latina.

CONCLUSIONES

Los participantes del Seminario Internacional "Microzonificación y Seguridad de Sistemas de Servicios Públicos Vitales" (UNI/CISMID-JICA-OPS-CONCYTEC; Ago. 23 - Set. 7 de 1990, Lima-Perú), provenientes de Perú, Argentina, Bolivia, Chile Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, México, Panamá y Venezuela, concluyen en consenso al final del evento:

* Las ponencias y discusiones del Seminario, a cargo de científicos peruanos y japoneses y de los participantes del evento, dieron no solamente una amplia y detallada visión del "estado del arte" en el tema, sino también de las realizaciones en los respectivos países de Sur y Centro-América.

* Los organizadores del Seminario acertaron en el énfasis temático, la microzonificación sísmica y la seguridad de sistemas de servicios públicos, en haber conjugado los diversos aspectos de la prevención, es decir la evaluación de amenazas, la evaluación de la vulnerabilidad, la estimación del riesgo, los preparativos para la atención de desastres y las técnicas de mitigación, tanto en la gama profesional de los participantes como en la cobertura temática, resaltando así el carácter multidisciplinario de la reducción de desastres, la necesidad de adelantar todas estas acciones coordinadamente y poniendo además de esta manera la microzonificación en el contexto que permite ver su aplicación, sus posibilidades de implementación y su relevancia social.

* El Seminario ha sido muy oportuno por cuanto tiende a aumentar la capacidad latinoamericana para atender sus problemas de potencial de desastres naturales al inicio de la "Década Internacional para la Reducción de Desastres".

* Sin dejar de lado los últimos avances en materia de microzonificación, el Seminario hizo énfasis en técnicas de evaluación eficientes de bajo costo. En resumen, se trataron principalmente los siguientes aspectos y métodos, además de la microzonificación de otros riesgos, como los debidos a tsunami, inundaciones, deslizamientos y asentamientos:

- el análisis histórico de fenómenos peligrosos de desastres y la evaluación de daños recientes, como el paso fundamental y menos costoso;
- los estudios geológicos de la estructura y litología de los terrenos;

- el levantamiento de los niveles de la napa freática;
- las técnicas geofísicas, complementarias con los análisis geológicos y geofísicos en la evaluación de las características del subsuelo;
- la medición de microvibraciones ambientales de los suelos, como una técnica de bajo costo y rápida para evaluar propiedades dinámicas y constitución general de los suelos;
- los estudios geotécnicos, principalmente la medición directa de la estructura y propiedades mecánicas de los suelos en perforaciones, sondeos y ensayos de laboratorio;
- el análisis del comportamiento dinámico de los suelos por medio de simulaciones matemáticas;
- el registro instrumental y análisis de movimientos sísmicos fuertes;
- la microzonificación con base en el análisis post-terremoto de la capacidad resistente de edificaciones,
- la observación y análisis detallado de fuentes sísmicas cercanas.

* Fuente a la aún muy generalizada concepción de los desastres naturales y particularmente los sísmicos como algo impredecible, inevitable o al menos de prevención demasiado costosa, el Seminario hizo evidente, una vez más y con detalles actualizados, que ya existen los conocimientos y técnicas para anticipar los probables efectos de terremotos.

* El conjunto de las metodologías, los estudios de casos así como los análisis de desastres ocurridos que fueron presentados, mostraron en forma dramática y contundente, cómo las condiciones físicas de los terrenos en la mayoría de las ciudades determinan en gran parte la magnitud de los efectos de sismos.

* El Seminario propuso, con muchos argumentos, reevaluar la concepción tradicional del concepto de la microzonificación, como una serie de métodos destinados a predecir las modificaciones de vibraciones sísmicas debidas a la estructura y propiedades físicas de los suelos, hacia un alcance más amplio, incorporando otros tipos de peligros naturales, como por ejemplo los deslizamientos, el potencial de licuación de suelos y las inundaciones.

* Los participantes también pudieron constatar que aún existe una gran brecha entre la capacidad y las realizaciones científicas y técnicas y la disposición de las instancias políticas, administrativas y económicas para verter las recomendaciones técnicas en políticas, proyectos, recursos y acciones para la prevención.

La mayoría de las microzonificaciones realizadas hasta ahora en Latinoamérica no han sido llevadas a la práctica.

* En el transcurso del Seminario se reconoció que falta mucha comunicación e intercambio entre los múltiples desarrollos que en diferentes disciplinas y en forma relativamente aislada se están realizando en Latinoamérica, situación que en parte explica algunas de sus dificultades y ante todo su falta de inserción político-administrativa y social.

Por otro lado, también se pudo constatar que Latinoamérica en conjunto ya tiene recursos humanos con los conocimientos necesarios para llevar a cabo estudios de microzonificación.

* El Seminario demostró la conveniencia y/o necesidad de realizar los estudios de microzonificación de manera multidisciplinaria y con integración horizontal, es decir abarcando las diversas amenazas naturales posibles en el área, y con integración vertical, es decir involucrando a los diferentes niveles comprometidos con la mitigación, como son técnicos, científicos, administradores, asociaciones profesionales y gobierno.

* El Seminario nos amplió una ventana hacia el Japón, país que ha sido pionero y vanguardia de la microzonificación pero a cuya información científica y técnica solo tenemos un limitado acceso, por razones del lenguaje.

* La participación y las exposiciones en el Seminario dejaron ver que la gran mayoría de las propuestas metodológicas y de las realizaciones en microzonificación son del sector universitario, en la mayoría de los casos llevados a cabo con exiguos recursos.

RECOMENDACIONES

En consecuencia, los participantes del Seminario se permiten recomendar, con el ánimo de que esto sea transmitido a los organismos e instituciones comprometidos de alguna manera con aspectos relacionados con la prevención de desastres naturales y para que se abran menos espacios para la realización de los objetivos sociales de nuestro trabajo técnico, lo siguiente:

- * Crear y fomentar diversos mecanismos para una mejor comunicación e interacción entre las personas, grupos de trabajos e instituciones que adelantan acciones en los temas que cubrió el Seminario, para así promover su trascendencia y capacidad de ejecución. En esto, organismos como el CISMID, pueden jugar un papel muy importante, por ejemplo como Centro Regional de Información. Específicamente proponemos que el conjunto de participantes se constituya en un grupo de trabajo a nivel latinoamericano, entre cuyas formas de comunicación debe incluirse un encuentro cada 2 ó 3 años, además de encuentros regionales.
- * Los profesionales que trabajan en los diversos aspectos técnicos de la microzonificación deben asumir la responsabilidad de informar y motivar a las otras instancias cuyo concurso demanda el objetivo de la prevención, es decir organizadores gubernamentales, agremiaciones, agencias financiadoras y aseguradoras, medios de comunicación, etc., de las verdaderas posibilidades para reducir el riesgo de fenómenos naturales como los terremotos.
- * Siendo que la prevención sísmica es técnicamente posible y por otro lado uno de los mandatos fundamentales de los Gobiernos es la protección de vidas y bienes de los ciudadanos, los organismos gubernamentales deben asumir su responsabilidad de actuar anticipadamente frente a los riesgos naturales, mediante políticas, proyectos, presupuestos y acciones específicas.
- * Promover una metodología de participación e integración en los proyectos de microzonificación y mitigación, que abarque las diferentes profesiones y niveles interinstitucionales.
- * Diseñar y promover una metodología para la evaluación de tipo "post-desastre", cuyos resultados serán de gran utilidad para derivar conclusiones y medidas aplicables a la prevención. Como objetivo principal, ésta metodología debe garantizar resultados comparables, generalizables y de procesamiento ágil, mediante formatos unificados.

Igualmente, determinar y promover unos objetivos mínimos así como recomendaciones metodológicas para microzonificar amenazas y vulnerabilidad.

Todo esto debe incluir también alternativas simplificadas, en razón de las probables limitaciones técnicas y económicas.

* Promover a todos los niveles y por diversos medios la difusión de información relacionada con la prevención de desastres naturales.

* Promover la microzonificación como un constituyente básico de la mitigación de riesgos naturales y ésta a su vez como una componente necesaria de la planificación urbana.

* Dar prioridad a la microzonificación de las ciudades más grandes y, en consideración de las limitaciones económicas a la implementación de recomendaciones para la mitigación del riesgo, promover prioritariamente guías para mejorar la existencia de tipos de construcción tradicionales como son el adobe y la mampostería no confinada.

* Promover la realización de inventarios de amenaza y riesgo a nivel nacional, principalmente con base en análisis de datos históricos y ocurrencias recientes y divulgar éstos entre autoridades y organismos.

* Promover a nivel universitario el conocimiento y carácter interdisciplinario de la prevención de riesgos naturales.

* Incluir en los proyectos de prevención no solo las componentes relacionadas con futuros diseños y desarrollos (p. ej. normas, códigos, etc.), sino también la reducción del riesgo en edificaciones y sistemas existentes y ante todo en instalaciones críticas y servicios públicos vitales.

* Promover la instalación y mejora de redes instrumentales y bancos de datos.