

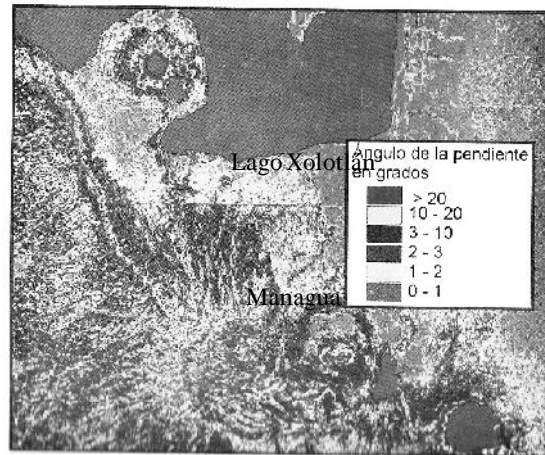
Geología, Geotecnia, Sismología y Dinámica de Suelos  
de la Ciudad de Managua

Por: Tupak Ernesto Obando Rivera

## I. Geología

En el presente documento se plantea y examina hallazgos relativos a las características estratigráficas y geológicas de la Ciudad de Managua, tipología de formaciones litológica que conforma la estructura geológica de Managua, y datos cualitativos y cuantitativos sobre la mismas; detalles de las propiedades geotécnicas del subsuelo. Se presentan modelos representativos de la organización del subsuelo en Managua desde el punto de vista estratigráfico, entre otros. Para una mejor visión de los conceptos plasmados en esta sección se emplearon múltiples e importantes recursos ilustrativos al respecto. El documento sigue el orden de contenido según trabajo original del presente autor de este documento citado en la Bibliografía.

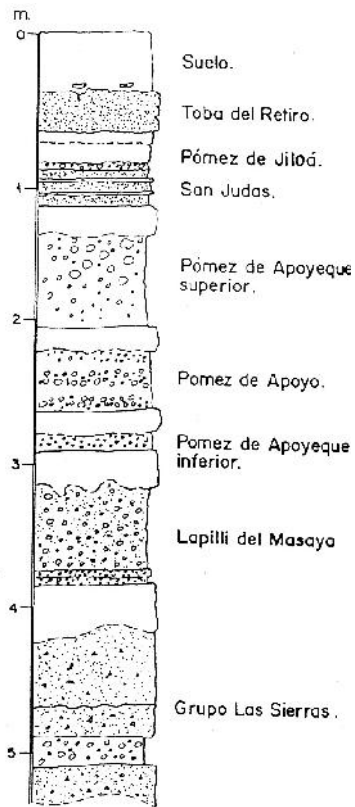
La Ciudad de Managua se asienta en una superficie plana que se inclina suavemente hacia el lago Xolotlán (Mapa 1); inclinación interrumpida en varios lugares por altozanos, la mayoría de origen volcánico (Cráteres Tiscapa, Nejapa, Asososca, Valle Ticomio y otros) (Parrales, 2001).



Pendientes del terreno en Managua.

Fuente: Ineter, 2000

Parrales, opina que subyaciendo el área se encuentra una brecha de toba volcánica (cantera) que pertenece a la parte superior de configuración geológica denominada Grupo La Sierra, cubierta por materiales piroclásticos del volcanismo Holoceno; una secuencia que consiste de lapilli, pómez, cenizas y tobas. Valera (1973), señala que los suelos se clasifican como limos no cohesivos, arenas y gravas, de pobre a bien consolidados y con diferentes grados de cementación, presentando por lo general bajas densidades y alta porosidad.



No obstante, Parrales (2001), aclara que la observación de la secuencia de materiales sobreyaciendo al Grupo La Sierra está contenida en la Columna Estratigráfica (Figura 36) propuesta por Woodward Clyde, 1975; Bice, 1973; Collin, y otros.

Secuencia estratigráfica generalizada.  
Fuente: Moore, 1991

Por su parte, Johansson (1988), quién explica que el subsuelo de Managua es relativamente homogéneo y su comportamiento dinámico es bueno durante eventos sísmicos, en vista que no ocurrieron grandes efectos geológicos.

Parrales (2001), comparte el criterio del Ingeniero Herman Taleno Delgadillo sobre la relación de las densidades de la estratigrafía del Grupo Managua con valores de N en cada tipo de material descrito en la Tabla 1.

### Características geotécnicas de los suelos en Managua

Tipo de materiales	Peso unitario (ton/m <sup>3</sup> )	Número de golpes por pie
Toba El Retiro	$\rho = 1.25 \text{ ton/m}^3$	$6 < N < 50$
Tres capas (Formación San Judas – cenizas)	$\rho = 1.3 \text{ ton/m}^3$	$13 < N < 34$
Suelo (fósil) debajo de la Formación San Judas.	$\rho = 1.3 \text{ ton/m}^3$	$10 < N < 32$
Pómez.	$\rho = 0.82 \text{ ton/m}^3$	$10 < N < 33$
Lapilli Fontana (escoria negra).	$\rho = 1.03 \text{ ton/m}^3$	$21 < N < 48$
Arenas (limosas, francas y gruesas).	$\rho = 1.41 \text{ ton/m}^3$ (1.5 ton/m <sup>3</sup> máx.)	$17 < N < 56$
Suelos pumáceos.	$1.16 < \rho < 1.4 \text{ ton/m}^3$	$15 < N < 32$
Suelos aluviales indiferenciados (suelos finos a gruesos).	$1.13 < \rho < 1.32 \text{ ton/m}^3$ $\rho_{prom.} = 1.22 \text{ ton/m}^3$	$12 < N < 32$
Suelos indiferenciados (capas superiores de color café o marrón sucio).	$\rho = 1.06 \text{ ton/m}^3$	$6 < N < 29$
Arcilla limosa (casi nunca presente).	$\rho = 1.2 \text{ ton/m}^3$	$20 < N < 66$

(Fuente: Parrales, 2001)

En breve se describe la secuencia estratigráfica desde la base al techo resumida en la Figura 1, para la ciudad de Managua recogida en el estudio Análisis del Comportamiento Dinámico de los Suelos durante Sismos en el área de Managua, de Moore (1991):

#### Grupo Las Sierras

Compuesto de materiales piroclásticos depositados en ambientes continentales lacustre o de agua someras. En su parte basal son tobas aglomeráticas, con pumicitas que se interdigitan con areniscas de la Formación El Salto. Hacia arriba siguen aglomerados tobáceos con pumicita subordinada e intercalaciones delgadas de areniscas. Continúan tobas y aglomerados de basaltos y bombas. El techo de este grupo consiste de gruesas capas de tobas intercaladas de lapillo. Se estima un espesor total de 650 metros.

### Abanicos aluviales

Son productos de acumulación resultantes de la erosión del Grupo Las Sierras al formarse escarpes de la Falla Mateare y de la Falla Las Nubes. Se puede identificar dos abanicos aluviales independientes superpuestos: uno resultante del escarpe de Mateare (formada con dirección al Noreste) y otro proveniente del escarpe Las Nubes (formada en dirección Noroeste). Estos abanicos cubren la zona Sur de la ciudad de Managua y coalescen por debajo de ellas.

### Grupo Managua

Es la secuencia geológica más reciente del área de Managua. Su espesor total es menor de los 10 metros en Managua. Consiste en secuencias de depósitos piroclásticos provenientes principalmente de dos grupos de volcanes: Grupo Apoyeque con los volcanes Apoyeque, Jiloá, Chiltepe y otros menores ubicados a unos 15 km al Noroeste de Managua. Grupo Masaya-Apoyo a unos 20km al Sureste de la Ciudad.

Los productos provenientes de volcanes ubicados en el área de Managua: Asososca, Nejapa y Tiscapa, se distribuyen en áreas relativamente pequeñas, muy cercana a los aparatos volcánicos. Se describen a continuación secuencia estratigráfica (Figura 37) desde el techo a la base del Grupo de Managua. Esta descripción está basada en estudios realizados por Woodward-Clyde (1975) y GHI (1973).

#### a) Suelo y aluvial del Holoceno.

Suelo geológicamente reciente. Consiste en arcilla limo-arenosa, limo no consolidado, arena limosa y gravas. Se presentan estratificados horizontalmente y a veces con estratificación cruzada. Su espesor varía de 20 a 60 cm.

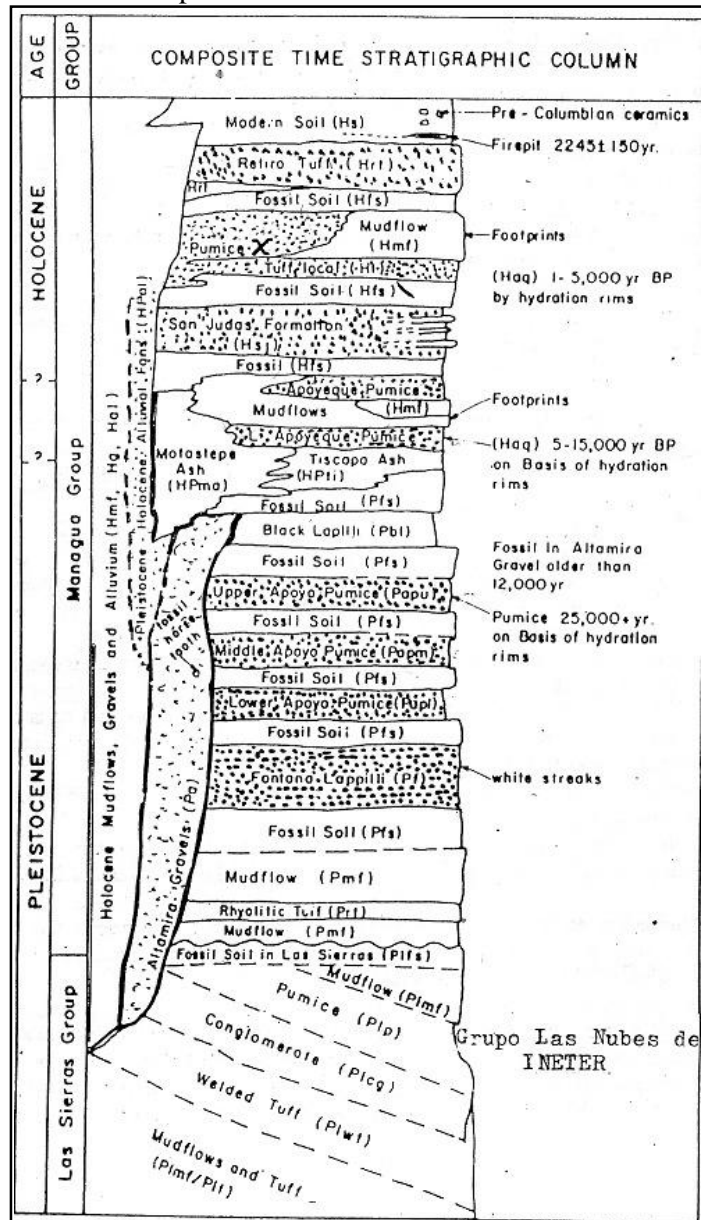
#### b) Toba El Retiro

Esta es una toba basáltica, depositada por caída aérea, masiva y consolidada. Es de grano fino, gris verdoso a café amarillento. Su espesor va de 50 a 100 cm.

Hogdson (2000), definen esta unidad como depósitos aéreos de ceniza fina basáltica, gris verdoso, compacto que alcanzan a constituir una toba masiva ligeramente friable, con espesores entre 20 cm a 2,5 metros con edad entre 2,200 a 3,700 años. Expresó, que esta unidad está superpuesta por suelo moderno y aluvional y subyacida por suelo fósil, pómez Apoyeque y flujo de lodo. Afirmó, que esta unidad se caracteriza por la presencia de pisolitos, restos de plantas y alta fracturación

Estratigrafía de Managua.

Fuente: tomado de Hogdson, 2000



c) Pómez de Jiloá y/o Apoyeque.

Consiste en tres unidades separadas de pómez blanca; posiblemente proveniente del volcán Apoyeque durante el Holoceno y Pleistoceno Tardío. El material es grueso en la base, gradando a dimensiones de ceniza cerca del techo.

Hodgson (2000), destaca tres unidades independientes de pómez blanco procedente del Volcán Apoyeque de edad Holoceno – Pleistoceno. Esta fuente, opina fue reconocida como Pómez de Jiloá por Bice en 1980, con espesor variable entre 0 a 40 cm, cuya edad medida oscila entre 1,000 a 5,000 años, y otros autores valoran datación de 6,600 años.

d) Formación San Judas

Esta unidad está compuesta de toba consolidada, intercalada con ceniza basáltica suelta y lapilli. Generalmente, consiste de dos delgadas capas de lapilli confinadas en tres capas delgadas de pómez. Su espesor promedio es de 25 a 30 cm.

Hodgson (2000), define esta unidad como una Triple Capa de toba bien endurecidas y friables, separadas por depósitos de lapilli incoherentes (basáltica), cuya edad varía entre 7,000 a 9,000 años, siendo superpuestos por suelos fósiles.

e) Ceniza de Motastepe

Consiste en varias unidades individuales de tefra, posiblemente provenientes del grupo de volcanes en el alineamiento Nejapa. Su color es gris claro, partículas de tamaño de ceniza fina a lapilli, se presentan bolones erráticos. Se distribuye a no más de 1km al Este de los cráteres de Nejapa. Según Hodgson (2000), se trata de unidades individuales de ceniza lapilli fina color gris claro, localizado a 1km al Este de la Caldera de Laguna Nejapa.

f) Ceniza de Tiscapa

Consiste en capas intercaladas de cenizas y lapillos, pobremente consolidadas, de color gris claro a gris oscuro. Su distribución se restringe a las cercanías del cráter Tiscapa, pero presume que base surges lo hayan distribuido a una distancia de 1km. La base de la unidad se asigna tentativamente al Pleistoceno Tardío.

Por su parte, Hodgson (2000), dijo que esta unidad es como una inter-estratificación de capas gruesas a finas de lapilli y cenizas de color claro a gris-oscuro, ligeramente consolidado, superponiendo a suelo fósil por encima de pómez.

#### g) Grava de Altamira

Esta es la única unidad aluvial que se puede identificar y correlacionar de lugar a lugar. Consiste principalmente de canales de gravas por estructuras de corte y relleno. Fue depositada por una serie de corrientes fluyendo en cuencas de drenaje relativamente pequeñas de aproximadamente 1km de ancho y no mayor de 10 a 12 km de largo. Las partículas de grava varían desde arena fina a grava fina.

Hogdson (2000), menciona que estas se caracterizan por la presencia de arcilla y limo, y sus variaciones desde la base al techo en el depósito gravoso. Aseguró, que esta grava tiene una edad del Pleistoceno ( $\pm 5,500$  años) según dataciones con radiocarbono realizada por la Academia de Ciencias de California (USA) a vestigios antiguos de diente de caballo, tipo *Equus c.f. E. Tau*.

#### h) Pómez Apoyo

Consiste en tres unidades separadas por suelo fósil. Las partículas, en las dos capas superiores, generalmente gradan de fino en la base y techo a grueso (1 a 5 cm) en el centro. La capa inferior presenta una textura uniforme desde su piso a su techo y consiste en arena y fragmento de pómez blanco.

Hogdson (2000), indicó que el nombre de esta unidad litológica, obedece a la proximidad geográfica, y al incremento de espesor de sus capas al Volcán Apoyo, cuya actividad se remonta hace 21,000 años, siendo los espesores oscilante entre 0.5 a 1,5 metros.



i) Lapilli Masaya o Formación Fontana de Lapilli

Es una de las formaciones más extendida y fácil de reconocer, en el área metropolitana de Managua. Consiste en lapilli basáltico vítreo, color negro, libre de polvo y cenizas.

Hogdson (2000), explicó que este material fue reconocido por vez primera en Villa Fontana, alcanzando espesores de hasta 3 metros. Este autor, dice que se trata de lapilli negro basáltico, libre de cenizas-polvo, suelto conteniendo de dos a tres bandas o hilos blancos de pómez.

No siendo así, Bice (1980), quién nombra esta unidad litológica como Lapilli Basáltico de Masaya, con espesores entre 1 y 3 metros, aumentando su potencia en el área de Las Nubes, al Sur de Managua teniendo como edad medida entre 25,000 a 35,000 años.

*Características geomecánica y física de suelos potencialmente licuables vinculados con yacimientos no metálicos en el área de Managua.*

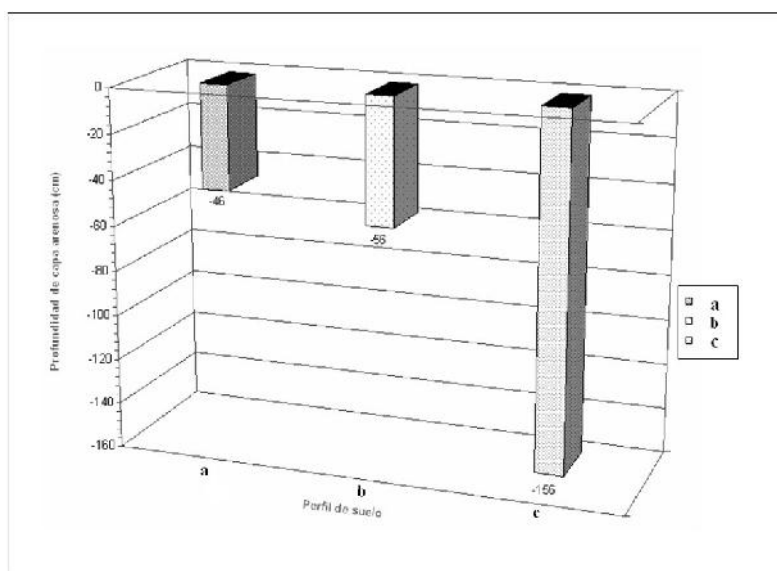
Según datos oficiales, la ciudad de Managua engloba aproximadamente 21 áreas de aprovechamiento minero no metálico dedicadas a la extracción y comercialización de volúmenes considerables de arenas naturales.

Dicha situación sugiere que entre los materiales geológicos y granulométricos que componen la estructura del subsuelo de la capital, aquellos con textura arenosa tienen mayor distribución geográfica en la municipalidad. Por ello, las obras de ingenierías deben construirse siguiendo las normativas técnicas vigentes en el país, en vista que las arenas en sí constituyen elemento importante e influyente para el efectivo desarrollo del proceso de licuefacción durante solicitaciones sísmicas.

De acuerdo con Obando, T. (2008), el perfil de los suelos representativo, que constituyen las capas arenosas se componen de lo siguiente:

- a. 0 a 46 centímetros, grisáceo a oscuro con tamaño de grano grueso a muy grueso, conteniendo gravas friables de tamaño de grano de fino a muy fino.
- b. 46 a 56 centímetros, grisáceo a oscuro, friables con tamaño de grano grueso a muy grueso.
- c. 56 a 156 centímetros, grisáceo a oscuro, deleznable, tamaño de grano grueso a muy grueso. Estas arenas ocupan espacios dentro de estratos arenosos cementados con espesor de 2 ó 3 centímetros.

### Ilustración de Sección de suelos arenosos en Managua.



Los depósitos arenosos (Véase Anexo No 8) se distribuyen en terrenos planos y escarpados de la ciudad, sobre todo, se presentan buenos afloramientos en los complejos de explotación minera no metálica que funcionan actualmente. En algunos lugares, los materiales arenosos ocupan pendientes máximas valoradas en 30%, en varios kilómetros cuadrados hacia todas las direcciones geográficas de Managua.

En el sitios del Estudio, se muestra superficialmente en forma generalizada capa aproximadamente de 0.50m de espesor de suelo orgánico y arena fina con contenido arenoso, seguido de la alternancia de capas de arenas finas, medias y gruesas que conforman un paquete de 14-16 metros de potencia. Cada una de las capas arenosas de distintos tamaños de grano presenta espesores individuales de 5 a 10 cm y 10 a 20cm.

Los ensayos analíticos de laboratorio (Véase Anexo No 8) confirman lo antes mencionado, estas se presentan a continuación en la Tabla II.1; a, b y c:

Número abertura Tamiz	Granulometría	
	ASTM C-44 MORTEROS	ASTM C-33 CONCRETO
% que pasa Tamiz 3/8		100
Nº 4	100	95-100
Nº 8	95-100	80-100
Nº 16	70-100	45-50
Nº 30	40-75	25-60
Nº 50	10-35	10-30
Nº 100	2-15	2-10
Nº 200	5 máx.	5 máx.
Cantidad de finura		2, 25-3, 25

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales y Suelos (IMS)

Materia orgánica: 3% máximo en ambos casos.

El % de arena que aprovecha esta empresa esta dentro del rango 75 – 90 %.

b) Valoraciones cuantitativas obtenidas de pruebas granulométricas

Nº Orden	Nº Tamiz	% que pasa por diferentes tamices en las diferentes pruebas				Promedio
		1 <sup>era</sup> prueba	2 <sup>da</sup> prueba	3 <sup>era</sup> prueba	4 <sup>ta</sup> prueba	
1	Nº 3/8	100	100	100	100	100
2	Nº 4	100	100	100	100	100
3	Nº 8	83	90	93	93	89.7
4	Nº 16	55	66	68	61	62.5
5	Nº 30	27	34	32	20	28.2
6	Nº 50	13	16	14	6	12.2
7	Nº 100	7	7	6	3	5.7
8	Nº 200	5	4	2	2	3.2
Cantidad de finura		3.15	2.97	3.17	3.17	3.04
Pruebas adicionales						
P.V.S.S. Kgs/m <sup>3</sup>		1404	1414	1437	1438	1422.3
Peso específico		2.40	2.43	2.40	2.41	2.41
Absorción		6.15	6.10	6.13	6.15	6.13

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales y Suelos (IMS)

Analizando los valores dados se determina que las características granulométricas de estas arenas las definen como aptas para la construcción, teniendo un alto porcentaje aprovechable dentro del rango de lo admisible. Ello no incluye evaluación técnica como material de soporte para infraestructura física, y su respuesta al momento de sismo.

c) Valoraciones cuantitativas obtenidas de pruebas granulométricas

Profundidad	Muestra N°	Resistencia a la Compresión			
		Condición SSS		Condición Seca	
		lbs/plg <sup>2</sup>	Kgrs/cm <sup>2</sup>	lbs/plg <sup>2</sup>	Kgr/cm <sup>2</sup>
6	1	894	63	1638	115.2
8	2	976	69	-	-
10	3	1057	74.3	-	-
12	4	1008	71.0	-	-
14	5	1203	85	-	-
16	6	1382	92.2	2352	165.4
18	7	1740	122.4	4266	300.0
20	8	-	-	-	-
22	9	2797	197	-	-
24	10	1236	87	2401	169
2	1	836	59	-	-
4	2	2545	179	3163	222.4
6	3	894	63	2222	156.3
8	4	1756	123.5	2595	182.5
10	5	1658	116.6	-	-
12	6	1756	123.5	1784	125.5
14	7	1658	116.6	2952	208
16	8	1951	137	3893	274
18	9	1593	112	-	-
20	10	1805	127	3390	238.4
22	11	1301	91.5	-	-
24	12	1057	74.3	1622	114.1

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales y Suelos (IMS)

A su vez, es preciso mencionar que otros de los materiales geológicos, a parte de las arenas, que se presentan de forma discreta en este sitio son las cenizas y escoria volcánica.

Por otro lado, hay que señalar que por mucho tiempo los productos arenosos que constituyen los suelos de minas, particularmente, la de tipo no metálico han sido de mucho provecho por empresa minera que reside en Managua. Entre ellas, tenemos por ejemplo, la compañía Inversiones Mineras S.A. (IMISA) que está en funcionamiento desde el año 1992, legalmente constituida en el Estado de Nicaragua.

De acuerdo a resultados experimentales geotécnicos de la compañía consultora Ingeniería de Materiales y Suelos (IMS), las arenas presentan granulometría fina a gruesa con fragmentos basálticos y andesíticos en proporciones de 80% y 20% respectivamente.

En la Tabla II. 2, se presentan ensayos analíticos realizados 14 ejemplares de arenas, apoyado del tamiz de medición 3/8" pulgada con vista a conocer sus propiedades físicas.

Tabla II.2. Propiedades mecánicas y física de suelos arenosos

ITEM	GRANULOMETRIA				OTROS
	ITEM	%	ASTM C-33 Concreto	ASTM C-144 Mortero	
1	% TAMIZ -3/8"	100	100		
2	% TAMIZ -3/8"	97	95-100	100	
3	% TAMIZ -3/8"	85	80-100	95-100	
4	% TAMIZ -3/8"	61	50-85	70-100	
5	% TAMIZ -3/8"	35	25-60	40-75	
6	% TAMIZ -3/8"	17	10-30	10-35	
7	% TAMIZ -3/8"	9	2-10	2-15	
8	% TAMIZ -3/8"	4	0-5	0-10	
PRUEBAS ADICIONALES					
9	MODULO DE FINURA		2.25-3.25	1.60-2.50	2.97
	Mod. Finura				2.5-3.2
10	MATERIA ORGANICA	1	3% MAX		
11	ABSORCION	3.7			
12	HUMEDAD	5.0-10.5			
13	PESO ESPECIFICO				2.69
14	DENSIDAD APARENTE				2.57-2.68

15	DENSIDAD REAL				2.84- 2.84
----	------------------	--	--	--	---------------

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales y Suelos (IMS)

Según Obando, T. (2008), a partir del análisis de laboratorio, se deriva que las arenas naturales elemento constituido del subsuelo capitalino y factor influyen en la licuefacción se acompaña, también de fragmentos de basalto con textura fenocrystalina y minerales máficos (augita y olivino). A su vez, se presentan en los ejemplares de mano analizados por microscopio petrográfico moderados contenidos de feldespatos que forma parte de la matriz fundamental de fragmentos de basaltos a igual que las plagioclasas, indicando composiciones básicas.

Esta misma fuente, considera que la matriz fundamental que constituye las rocas basálticas (proporción del 80%) es oscura debido a la presencia de partículas de mineral metálico sobre la cual se encuentran insertadas los minerales máficos y félsicos antes citados.

Alrededor del 20% está compuesto por fragmentos de andesita con estructura de masa fundamental inter-granular de textura afanítica. Finalmente, un contenido mínimo de minerales arcillo-ferruginoso que es causa de las sucesivas alteraciones de masa cementante de estos minerales

## II. Geotecnia

---

En este documento se caracteriza geotécnicamente el área estudiada con énfasis en las propiedades geomecánica de los suelos capitalinos, cuyos detalles se recogen en el presente documento de investigación. Esta información es vital para la proposición de la metodología investigativa de esta tesis. Se propone sistemas de clasificación de los suelos en función de parámetros dinámicos y mecánicos del terreno. Se plantea información sobre los ensayos de Penetración estándar (SPT), condiciones de aplicación, instrumental usado para su realización y otros datos numéricos y atributivo relativo a propiedades deformacionales del subsuelo.

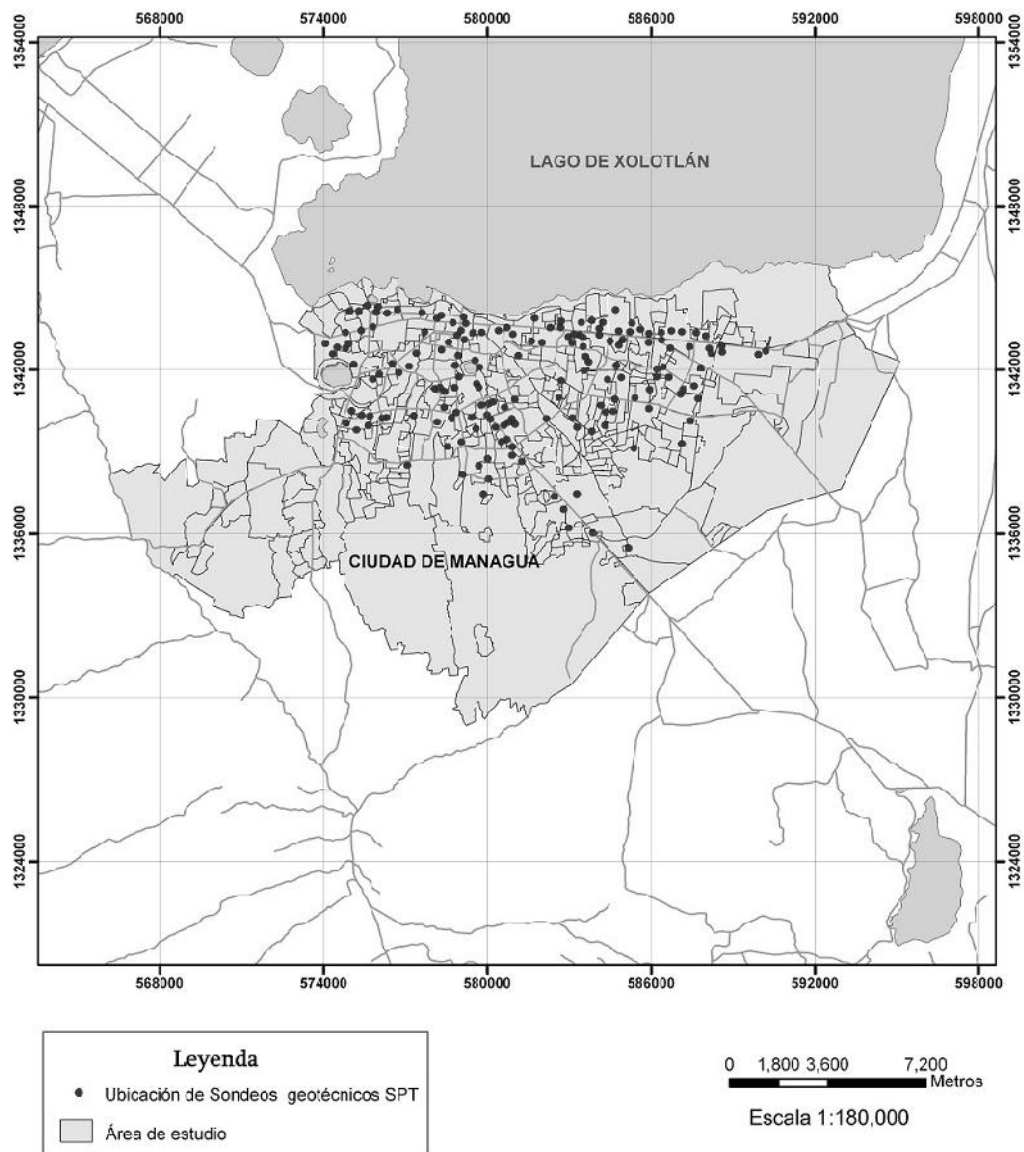
---

La información geotécnica empleada para el análisis dinámico procede básicamente de dos fuentes:

a.- Sondeos y datos geotécnicos recogidos en la publicación “Análisis del Comportamiento dinámico de los Suelos durante Sismos en el Área de Managua, Nicaragua”, de Franklin Moore (1,991)

b.- Serie de sondeos y datos geotécnicos reunidos en la publicación “Análisis del Espectro de Respuesta en el Área de la Ciudad de Managua”, de Rainer Parrales (2,001) Todos estos sondeos corresponden a ensayos de penetración estándar (Norma ASTM D-1586) y cuyas profundidades dependen de la existencia de un material extremadamente compacto y considerable espesor (generalmente más de 4 metros) que dificultó la continuación de la prueba de penetración estándar. La ubicación de estos sondeos se presenta en el Mapa que sigue.





Los puntos representan mediciones geotécnicas realizadas para Managua

En la Tabla adjunta se presenta la lista de estos sondeos indicando su ubicación, profundidad y descripción con base a la estructura o sitio de su ubicación. En este estudio se emplean solo los sondeos que tuvieron información completa y confiable, en lo especial lo referente al número de golpes N, Velocidad de Corte, Módulo Cortante y Clasificación del Material. Se descartaron sondeos de profundidad muy somera o que estuvieran muy cercanos a otros de mayor profundidad, siendo utilizados en este caso para fines de verificación y completar los sondeos utilizados en este trabajo.

Para la Clasificación de los suelos se empleó el sistema planteado en el artículo 25 relativo a la Influencia del Suelo y Períodos del Edificio recogidos en acápite de “Normas Mínimas para Determinar la Carga debida a Sismos” del Reglamento Nacional de la Construcción de año 2007. Dicho sistema propuesto considera los suelos agrupados en cuatro clases de terreno (Tabla No 1), en función de sus particularidades físicas:

Tabla No 1. Clasificación de los suelos según velocidad de corte

Categoría	Descripción	Velocidad de Corte
Tipo I	Afloramiento rocoso	$V_s > 750$ m/s
Tipo II	Suelo firme	$360 < V_s \leq 750$ m/s,
Tipo III	Suelo moderadamente blando	$180 \leq V_s < 360$ m/s,
Tipo IV	Suelo muy blando	$V_s < 180$ m/s

(Fuente: RNC, 2007)

Por su lado, Moore (1991), considera ventajoso zonificar el subsuelo de Managua con base a la compacidad de estos (Tabla 4), de acuerdo a la tenacidad mecánica de los materiales geológicos. Para esto, Faccioli, E. et al. (1973), propone la zonación de los suelos agrupados en tres categorías (las zonas descritas van de más superficial: I, a más profundidad: III)

Tabla No 2. Clasificación de los suelos según valores de n

Zona	Rango de N	Compacidad	Material
I	$N < 10$	Suelta	Arenas limosas (en algunos sitios arcillas y relleno)
II	$10 < N < 50$	Media a compacta	Arenas medias densas, pómez, gravas, conglomerados y cantera
III	$N > 50$	Duro a muy compacto	Predomina la cantera

(Fuente: Moore, 1991)

### 5.1.- Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

De acuerdo con Vallejos (2002), este ensayo de penetración dinámica se realiza en el interior del suelo durante la perforación. Permite obtener un valor de N de resistencia a la penetración, correlacionable con otros parámetros geotécnicos (velocidad de corte, modulo cortante, y otros). (Foto No 1)



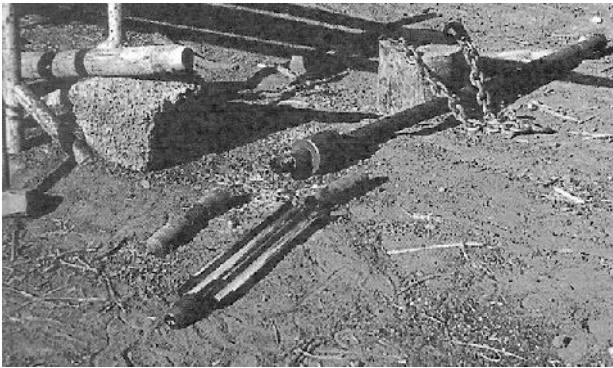
Equipo de perforación para sondeos geotécnicos.

Expresó, que la frecuencia habitual para la realización del SPT a lo largo del sondeo es de un ensayo de 2 a 5 metros, o incluso mayor, en función de las características del terreno.

El procedimiento consiste en hincar en el terreno barreno metálico contando el número de golpes necesario para hincar tramos de 15 cm. El golpeo para la hincia se realiza con una maza de 63.5 kg cayendo libremente desde una altura de 76 cm sobre una cabeza de golpeo o yunque. La lectura del golpeo del primero y último tramo no debe tener en cuenta, por la alteración del suelo o derrumbes de las paredes del sondeo en el primer caso, y por posible sobre-compactación en el segundo. La suma de los valores del golpeo de los dos tramos centrales de 15 cm es el valor N, denominado también

resistencia a la penetración estándar.

En ocasiones, dada la alta resistencia del terreno, no se consigue el avance del tomamuestras. En estos casos, el ensayo se suspende cuando se exceden 100 golpes para avanzar un tramo de 15 cm, y se considera rechazo. (Foto No 2)



Tomamuestras, puntazas y elementos del ensayo SPT.

Afirmó, que el resultado de los ensayos SPT (Foto 3) pueden ser afectados por factores como:

Preparación y calidad del sondeo: limpieza y estabilidad de las paredes de perforación



Equipo de SPT (Foto T. Ernesto O bando R.)

Longitud del varillaje y diámetro del sondeo: condicionan el peso del elemento a hincar y la fricción con las paredes del sondeo.

Dispositivo del golpeo: puede ser manual o automático, existiendo diferencias notables entre los resultados de ambos. Deben emplearse dispositivos automáticos, pues garantizan la aplicación de misma energía de impacto en todos los casos.

Según Delgado (2000), las variables que inciden en los resultados del SPT son:

- Peso y altura de caída del martillo
- Profundidad de perforación
- Limpieza del fondo de perforación
- Flujo de material hacia la perforación
- Diámetro de la perforación
- Presencia de material grueso o muy fino
- Descuido en el conteo de golpes
- Estado de los equipos
- Dejar caer bruscamente la barra de perforación
- Lavado excesivo.

Algunos especialistas como Kulhawy y Mayne (1990), ilustran en la Tabla 3 los factores que afectan el SPT.

Tabla 3. Factores influyentes en los resultados de un SPT

	el peso; (son comunes las variaciones de 5 a 7 por ciento)	
El martillo golpea excéntricamente el collar de la barra de barreno	Reducción de energía del martillo	Aumenta
Falta de caída libre del martillo debido a la deficiencia de lubricación de roldanas, nuevo cable rígido sobre el peso, más de dos vueltas sobre el cabrestante, soldadura incompleta de cable en cada caída	Reducción de energía del martillo	Aumenta
El muestreador es manejado sobre el fondo del revestimiento	Muestreador manejado en suelo disturbado, artificialmente densificado.	Aumenta grandemente
Conteo descuidado de los golpes	Resultados inexactados	Aumenta o disminuye
Empleo de un muestreador no convencional	Correcciones con muestreador convencional no son válidas	Aumenta o disminuye
Grava gruesa o cantos rodados en el suelo	El muestreador se atora u obstruye	Aumenta
Uso de barra torcida de barrenos	Transferencia inhibida de energía al muestreador	Aumenta

Fuente: Rennat, E. et. al. (1997)

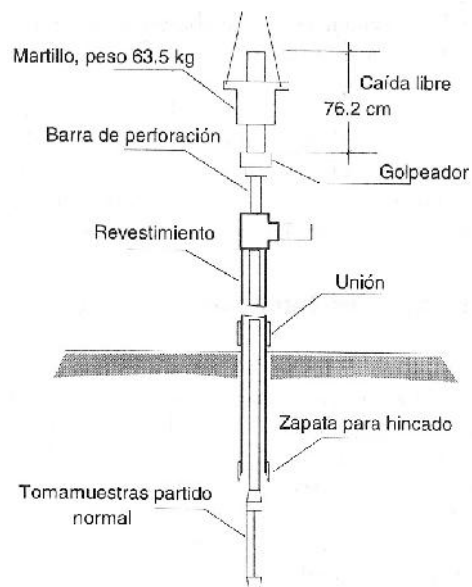
Vallejos (2002), señala que cuando el ensayo se realiza por debajo del nivel freático se utilice la corrección propuesta por Terzaghi y Peck en el año 1948, aplicable a suelos pocos permeables (limos y arenas finas):

$$N = 15 + [N' - 15]/2]$$

Válida para  $N' > 15$ , siendo N el valor corregido y  $N'$  el valor medido.

El amplio uso del SPT ha permitido establecer una serie de correlaciones con diferentes parámetros geotécnicos como por ejemplo, modulo cortante velocidad de ondas de corte y compacidad de suelos granulares, y otros, los cuales se explican a continuación.

Delgado (2000), resumen el procedimiento SPT de la manera siguiente; consiste en determinar el número N de golpes de un martillo con peso de 63.5kg (140lb) y 762mm (30 pulgadas) de altura de caída, necesario para hincar en el suelo inalterado un tomamuestra partido normal en una distancia de 305 mm (1 pie). Después que el tomamuestra toca fondo, el martillo debe golpearlo a través de las barras hasta penetrarlo 150mm (6 pulgadas); en este momento se inicia propiamente el ensayo y es cuando el técnico debe contar el número N de golpes necesario para avanzar los siguientes 305mm (1.0 pie). (Figura No 1)



Esquema de la disposición de los elementos para tomar la muestra y ejecutar el SPT

Por su parte, Peck (1991), dice que para considerar la falta de apoyo, los golpes de los primeros 15 cm de penetración no se toman en cuenta; los necesarios para aumentar la penetración de 15 a 45 cm constituyen el valor N. Esta misma fuente, menciona que los resultados de la penetración estándar pueden correlacionarse aproximadamente con algunas propiedades importantes del suelo simplificadas en la Tabla 6.

Según Delgado (2000), la energía efectiva entregada al martillo de seguridad es del orden de 60% de la energía teórica de 475J, valor basado en el producto de valores normalizados: peso del martillo por la altura de caída.

Tabla 4. Correlación entre la resistencia de penetración y las propiedades del suelo a partir de la prueba de penetración estándar

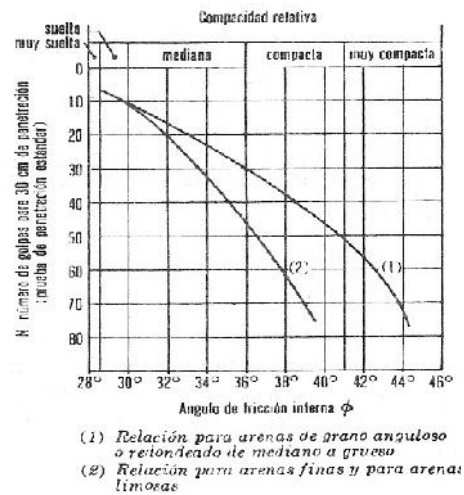
Arenas (Bastante Segura)		Arcillas (Relativamente Insegura)	
Número de Golpes por 30 cm, $N$	Compacidad Relativa	Número de Golpes por 30 cm, $N$	Consistencia
0-4	Muy suelta	Menos de 2	Muy blanda
4-10	Suelta	2-4	Blanda
10-30	Media	4-8	Media
30-50	Compacta	8-15	Firme
Más de 50	Muy compacta	15-30	Muy firme
		Más de 30	Dura

Fuente: Peck (1991)

De igual manera, Badillo et. al. (2006), opina que la utilidad e importancia de la prueba de penetración estándar radican en las correlaciones realizadas en el campo y laboratorio de diversos suelos, sobre todo arenas, que permite relacionar la compacidad, ángulo de fricción interna, en arenas, y el valor de la resistencia a la compresión simple  $q_u$ , arcillas, con el número de golpes en este suelo para que el penetrómetro estándar logre entrar los 30 cm especificados. Para obtener estas relaciones basta realizar la prueba estándar en estratos accesibles o de los que se puedan obtener muestras inalteradas confiables y a los que se les pueda determinar los valores determinados; haciendo suficiente número de comparaciones pueden obtenerse correlaciones estadísticas dignas de confianza. En la práctica esto se ha logrado en los suelos friccionantes, para los que existen tablas y gráficas dignas de crédito y aplicables al trabajo práctico.



En la Figura 2 se observa que al aumentar el número de golpes se tiene mayor compacidad relativa de la arena y, consecuentemente, mayor ángulo de fricción interna. También se ve que en arenas limpias medianas o gruesas para el mismo número de golpes, se tiene un mayor que en arenas limpias finas o que en arenas limosas.



Correlación entre el número de golpes para 30 cm de penetración estándar y el ángulo de fricción interna de las arenas.

Badillo et. al. (2006), sugiere que para pruebas en arcillas, Terzaghi y Peck, dan la correlación que se resumen en la Tabla 6, cuyo uso es reservado. Puede observarse en la Tabla 7 que, prácticamente, el valor de  $q_u$ , en  $\text{kg/cm}^2$  se obtiene dividiendo entre 8 el número de golpes.

Tabla 5. Correlación entre la resistencia de penetración y resistencia a la compresión simple.

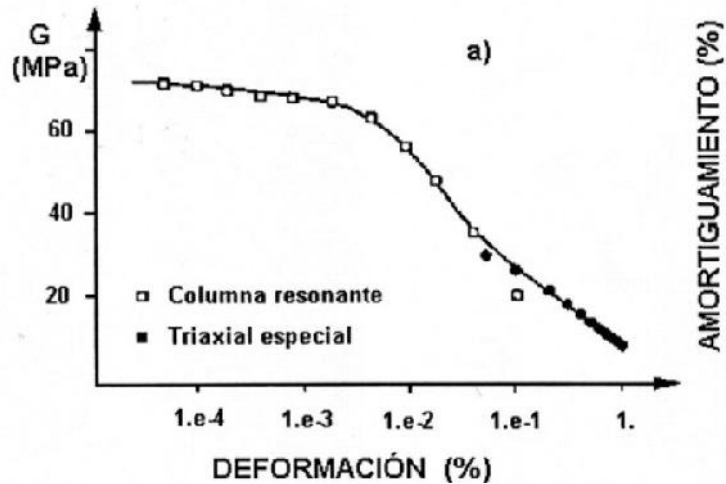
Consistencia	No. de golpes, N	Resistencia a la compresión simple, $q_u$
		$\text{kg/cm}^2$
Muy blanda	< 2	< 0.25
Blanda	2-4	0.25-0.50
Media	4-8	0.50-1.0
Firme	8-15	1.0-2.0
Muy firme	15-30	2.0-4.0
Dura	> 30	> 4.0

### 5.1.1.- Módulo cortante

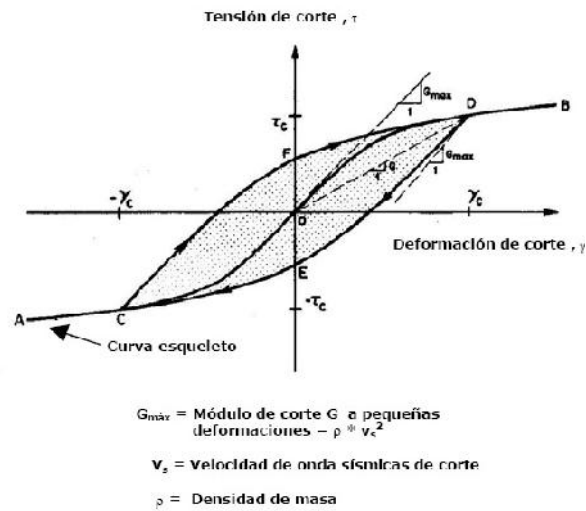
Hoy día es conocido que para el estudio pleno del comportamiento de un depósito de suelo se solicita entender uno de los parámetros físicos importantes en el fallo del terreno (asentamientos, deslizamientos, licuefacción y otros), como es el Módulo Cortante y otros que se dilucidan más adelante.

Muchos trabajos sobre comportamiento cíclico de suelos han estudiado la relación tensión de corte - deformación de corte usando como primera acercamiento la teoría de la elasticidad. Así definen un módulo de corte  $G$ , apropiado a nuestro nivel de deformaciones, que disminuye al aumentar éstas

Relación esfuerzo - deformación de corte .



Algunos expertos señalan diversos modelos más simples y más comúnmente utilizados para el estudio del comportamiento dinámico de los suelos que trabajan con la teoría de la elasticidad son los modelos de suelo lineal equivalentes que consideran a un suelo como un material visco elástico lineal. En ellos el comportamiento no lineal es tenido en cuenta mediante la dependencia de los parámetros de rigidez ( $G$ ) y amortiguamiento del suelo con la deformación. Sin embargo, no permiten que se desarrollen deformaciones permanentes. La rigidez del suelo es caracterizada normalmente por el módulo de corte máximo ( $G_{\text{máx}}$ ), el cual se encuentra para pequeñas deformaciones, y por una curva de reducción del módulo ( $G/G_{\text{máx}}$ ) en la que se observa como el módulo de corte decrece para grandes deformaciones. (Figura 4)



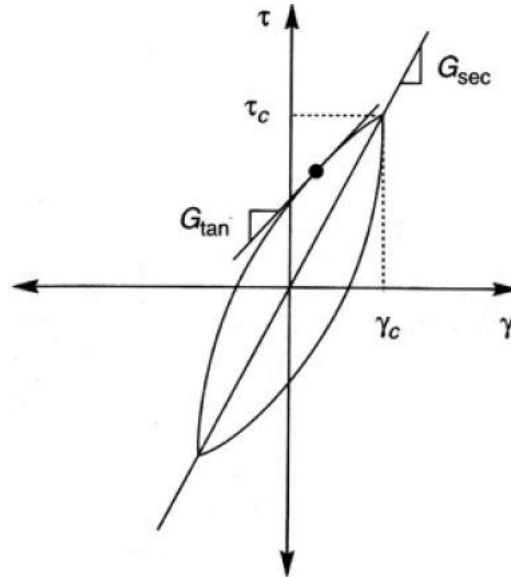
Curva histerética (curva esqueleto) esfuerzo - deformación

Este modelo lineal equivalente, ha sido en reiteradas ocasiones corroborados con estudios realizados por varios especialistas como Dobry y Vucetic (1987), y Steven L. Kramer (1996), quienes opinan que en dicho modelo intervienen una carga cíclica simétrica de corte en el subsuelo y una deformación cíclica de corte que da origen a una curva esqueleto esfuerzo-deformación con tal como se plantea en la figura anterior.

En términos generales, dos importantes parámetros “lineal equivalentes” se pueden obtener directamente de la curva. El primero es el módulo de corte secante:

$$G = G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c} = \text{pendiente de la recta OD}$$

Este parámetro ofrece información de la inclinación de la curva. La inclinación depende de la rigidez del suelo que se puede describir, en cualquier punto, durante el proceso de carga mediante el módulo de corte tangente,  $G_{tan}$  (Figura 5). Obviamente  $G_{tan}$  varía a lo largo de un ciclo de carga, pero su valor medio se puede aproximar por  $G_{sec} = G_s$ .



Descripción gráfica de  $g_{sec}$  y  $g_{tan}$ .

El valor de  $G_{m\acute{a}x}$  es el valor de  $G_s$  obtenido para una deformación cíclica nula, siendo por tanto, el valor del módulo de corte secante es alto para amplitudes de deformación bajas, pero que disminuye a la vez que la amplitud de deformación crece. Para valores superiores a 10-2 % de deformación cíclica la relación entre módulos,  $G_s/G_{m\acute{a}x}$ , cae a valores inferiores a 1.

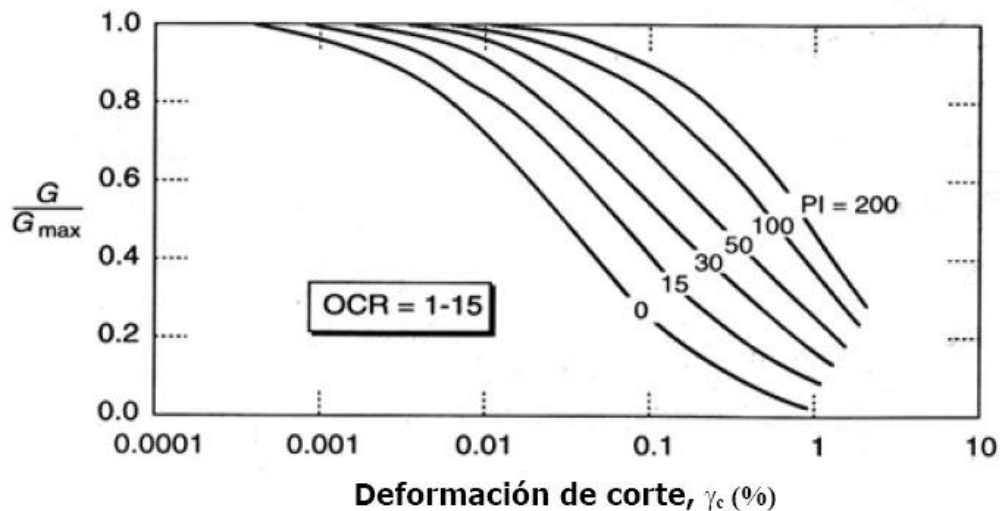
En un modelo “lineal equivalente” la caracterización de la rigidez de un elemento de suelo requiere, por tanto, considerar  $G_{m\acute{a}x}$  y la forma en que  $G_s/G_{m\acute{a}x}$  (módulo reducido) varía con la amplitud de deformación cíclica y otros parámetros. La variación del

Por otro lado, debido a que en la mayoría de los ensayos sísmico-geofísicos se inducen deformaciones de corte pequeñas de aproximadamente  $3 \cdot 10^{-4} \%$ , se puede usar la velocidad de ondas de corte medida para valorar  $G_{\text{máx}}$  como:

$$G_{\text{max}} = \rho v_s^2$$

El uso de las velocidades de onda de corte es en general la forma más fiable de evaluar “in situ”  $G_{\text{máx}}$  para un depósito de suelo particular, y para ello se usan principalmente los ensayos sísmico-geofísicos de Cross-Hole, Down-Hole y Up-Hole.

Es preciso expresar, que en los inicios de la ingeniería geotécnico-sísmica, los comportamientos del módulo reducido ( $G/G_{\text{máx}}$ ) para suelos de grano grueso y grano fino se analiza por separado, dato corroborado por Seed e Idriss (1970). Sin embargo, estudios recientes han revelado una transición gradual entre el comportamiento del módulo reducido para suelo no plástico de grano grueso y el del suelo plástico de grano fino. Algunos investigadores (Zen et al., 1978; Kokusho et al. 1982; Dobry y Vucetic, 1987; y Sun et al. 1988), señalaron la influencia de la plasticidad de un suelo en la curva del módulo reducido (Figura 6), en que se muestra el umbral de deformación al corte cíclico lineal, es mayor para suelos altamente plásticos que para suelos poco plásticos, siendo importante en procesos como la amplificación o atenuación de los movimientos sísmicos



Influencia del índice de plasticidad en la curva  
de reducción del módulo.

Según Franklin Moore en su estudio Análisis del Comportamiento Dinámico de lo Suelos durante Sismos en el área de Managua (Nicaragua), este módulo de corte ( $G$ ) está en función de la cantidad de los esfuerzos y deformaciones aplicados al suelo. Para la cuantificación del valor de  $G$ , se emplean métodos de campo y laboratorio, la mayoría de estos laboriosos y costosos. Tenemos los siguientes:

- a)- Procedimientos geofísicos
- b)- Ensayo triaxial cíclico
- c)- Ensayo de columna de resonancia

Pese a esto, actualmente, se han establecido relaciones experimentales de campo en función de valores del número de golpes ( $N$ ) suministrado al terreno obtenido de procedimiento geotécnico conocido como Prueba de Penetración Estándar (SPT, siglas en inglés). Moore (1990), opina que las relaciones citadas son importantes por accesibilidad de datos a partir de estudios geotécnicos realizados en desarrollos urbanos. Una de estas relaciones de variables es la de Osaki e Iwasaki propuesta en el año 1973 para cuantificar el valor inicial del inicial de  $G_0$ . Dada por la expresión:

$$G_o = 1200N^{0.8}$$

Donde:

$G_o$ : Módulo dinámico de un estrato para deformaciones pequeñas.

N: Número de golpes en el SPT.

Sin embargo, el autor de la presente investigación, tras una amplia tarea de compilación y análisis de datos geotécnicos ha logrado formular una ecuación matemática de  $G$  en función de los números de golpes para la Ciudad de Managua como se verá más adelante.

Parrales, 2001, expresa que el módulo de corte depende sobre todo de la magnitud de las deformaciones, cuyo cálculo se logra aplicando procedimientos de laboratorio y de campo. Estos últimos, parten del conocimiento de las velocidades de ondas sísmicas generadas a través del uso de explosivos y/o el impacto de cargas en el suelo. Algunas pruebas de campo, son el método Dowhole, el método de refracción sísmica y el SASW. Para el caso de la determinación del valor  $G$  por esta vía se emplea la ecuación siguiente:

$$G = \text{densidad de la masa} \times V_s^2$$

Densidad de la masa = Peso volumétrico/g (gravedad)

Destacó, que hay métodos indirectos para determinar el módulo cortante, por medio de relaciones experimentales entre  $G$  y el número de golpes por cada 30 cm de la prueba de penetración estándar (ASTM D-1586). Algunas relaciones matemáticas conocidas fueron propuestas por Ohsaki e Iwasaki (1973), Ohta y Goto (1976), Hardin y Black (1968)

En la actualidad, según López, S. (2005), se ha desarrollado un nuevo modelo, componente importante, para suelos arenosos, que define un parámetro de medición del estado de degradación de la rigidez de los suelos desde el inicio de la aplicación de carga dinámica. Expresó, que este modelo constituye una herramienta útil para simular el comportamiento del terreno influenciado por geo-estructuras, y sometidos a

solicitaciones sísmicas. Afirmó, que este modelo fue aplicado y validado tomando como escenario geográfico piloto la Presa de San Fernando en California (USA), en donde acontecieron procesos de licuación del suelo en el año 1971, siendo este lugar afectado por sismo de considerable magnitud. Dicho modelo matemático se define como sigue:

$$\psi = \frac{G_0}{G_0 - G}$$

Donde:

$G_0$  y  $G$  son módulo tangencial elástico de cizalla inicial y actual, respectivamente. A continuación, el símbolo  $\psi$  parámetro de degradación física del suelo toma valores que oscilan entre el infinito (cuando comienza la carga) a 1 (cuando  $G$  es cero). Es decir, Al comienzo de la carga, tiende a infinito, mientras que para los suelos de alta la degradación, tiende a 1

#### 5.1.2.- Velocidad de Corte

Parrales (2001), explica que uno de varios parámetros dinámicos influyente en la conducta del suelo lo constituye la velocidad de corte, medio a través del cual se lograr obtener el valor  $G$  de los materiales del subsuelo. Uno de los modelos matemáticos más usados para el cálculo de la velocidad de corte fue propuesto por Imai y Fumoto en el año 1975, teniendo como expresión numérica la siguiente:

$$V_s = 89.8N^{0.341}$$

En la confección del mapa de iso-velocidades de ondas de corte de los suelos de la ciudad de Managua se consideran los valores del ensayo de penetración estándar ( $N_{SPT}$ ) del suelo contenido en la investigación “Análisis de Espectros de Respuesta en el Área de la Ciudad de Managua”, de Rainer Parrales (2001)

No obstante, se ha formulado una relación numérica de la velocidad de corte en función del número de golpes a partir del análisis minucioso de datos geotécnicos en el área de la ciudad de Managua, expresó Tupak Obando, autor de la presente investigación.



Según Henríquez (2007), el uso de velocidad de propagación de las ondas de corte, como un índice de la resistencia a la licuación, se justifica con el hecho de que la misma y la resistencia a la licuación, están influenciados por la densidad, confinamiento, historia de tensiones y edad geológica existente en el terreno. El uso de la velocidad de propagación de las ondas de corte ( $V_s$ ) presenta las siguientes ventajas:

- 1) La velocidad de propagación de las ondas de corte ( $V_s$ ) puede ser medida con precisión mediante varios ensayos in situ y otros métodos sísmicos y geofísicos.
- 2) Su medición es posible en suelo donde resulta difícil la toma de muestras, como las gravas, y en sitios donde los sondeos no son permitidos.
- 3) Se pueden realizar mediciones en pequeños especímenes en laboratorio, permitiendo la comparación directa entre el comportamiento en laboratorio y el comportamiento en el campo.
- 4) Están directamente relacionada con pequeñas deformaciones como el módulo de corte máximo  $G_{max}$ , el cual es un parámetro necesario para la evaluación analítica de las deformaciones tangenciales dinámicas.

No obstante, Henríquez (2007), señala dos principales limitantes del uso de las velocidades de ondas de corte para la evaluación de la resistencia a la licuación. Estas son las siguientes:

- 1) La carencia de una muestra para la identificar los finos que no son susceptibles a sufrir licuación.
- 2) Las mediciones son sensitivas a la frágil cementación inter-granular, la cual puede ser producida por envejecimiento u otro proceso de cementación, siendo eliminados en largas deformaciones. Por ello, deben ejecutarse sondeos y ensayos de penetración para identificar los suelos frágilmente cementados y los arcillosos (no susceptible a sufrir licuación).

Según Cees Van Westen et. al., en su estudio Aplicación de SIG para la evaluación de la amenaza sísmica y el riesgo asociado: Kathmandu, Nepal, reconocen que la Velocidad de Onda Cortante es un parámetro del suelo muy importante en ingeniería sísmica. Intuitivamente, uno puede entender que un cuerpo muy fuerte o un suelo rígido (o un suelo con una velocidad de onda cortante alta) se comporta de manera diferente bajo la vibración causada por un terremoto. La velocidad de onda es dependiente del modulo de esfuerzo cortante máximo. El modulo cortante puede ser determinado en condiciones de laboratorio. Varias relaciones teóricas y empíricas existen para relacionar velocidad de onda de corte con el modulo cortante.

$$G_{\max} = \gamma \cdot V_s^2$$

Donde:

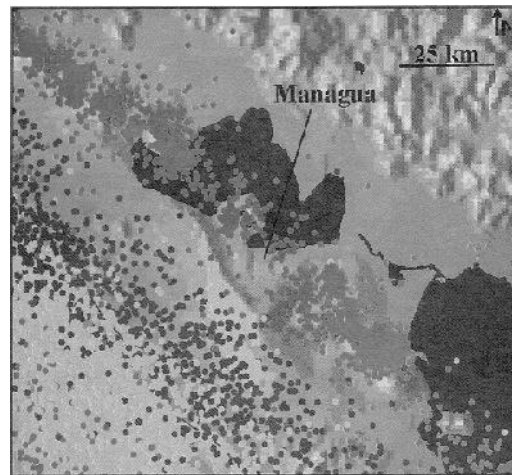
$\gamma$  = Densidad de masa (kg /m<sup>3</sup>)

$V_s$  = Velocidad onda cortante (m/s)

### III. Sismología

En este documento se considera y profundiza la situación sísmica de Managua y su relación con las condiciones tectónicas del país. Se muestran modelos actuales de las fuentes sismogeneradoras nacionales y la posición que ocupa la ciudad capital en ese escenario general, tipo de sismicidad originada en la zona de subducción y continental. Para esto se hizo mostraron recursos gráficos, cartográficos, tablas y diagramas de relación entre variables dinámicas y otros para reforzar aún más estos conocimientos. El documento sigue el orden de contenido según trabajo original del presente autor de la investigación, citado en la Bibliografía.

En la actualidad, Parrales (2001), señala que los temblores sentidos en Managua tienen origen, principalmente, en dos fuentes sísmicas, una relacionada con la Subducción y otra con temblores ocurridos dentro de la corteza, al interior de la placa Caribe. Según Ineter (2000), Managua se ubica directamente en zona peligrosa, donde ocurren los sismos de foco superficial en la cadena volcánica (Mapa 2). A su vez, los sismos ocurridos en Managua en los últimos 25 años fueron de baja magnitud, y la mayoría de ellos ocurrió en los años 1970.



Sismicidad de Managua.

Período 1975 – 1999

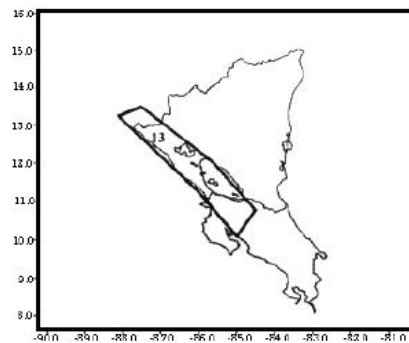
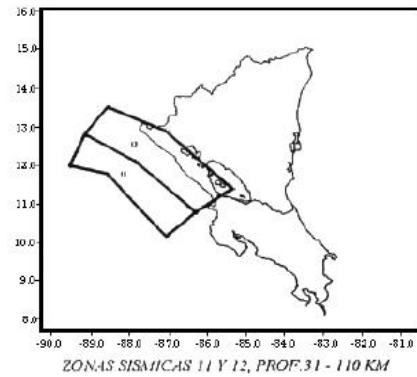
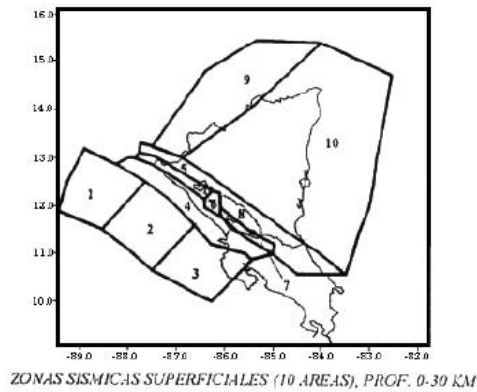
En la Mapa 2, se observa que los sismos superficiales (círculos rojos) se concentran en una banda estrecha de sólo 20 km de ancho. Esta banda coincide con la cadena volcánica, en donde Managua ocupa el eje de esta banda y es la ciudad más peligrosa en Nicaragua. Los sismos muy profundos (círculos verdes y azules) son menos peligrosos por que la distancia espacial supera los 100km.



Aseguró, que el proceso de Subducción genera temblores a partir de unos 10 km de profundidad bajo el piso oceánico hasta profundidades máximas de unos 250 km. La zona sísmica de subducción (Mapa 3) se denomina zona de Wadatti-Beniof, que se divide en dos segmentos de acuerdo a sus características geométricas, descritas a continuación:

#### Ambiente tectónico y geología

Los sismos que ocurren a profundidades entre 15 y 50 km se denominan sismos interplaca. Se distribuyen en las tres primeras fuentes sísmicas de la Figura 38. En el segundo segmento o sub-zona se originan los temblores intraplaca, a profundidades mayores de 50 km en el interior de la Placa Cocos cuando una parte de esta se sumerge en el interior el planeta.



Fuente sismogeneradora en Nicaragua

A demás, los temblores intraplaca se distribuyen en las zonas sísmicas 11, 12 y 13 de la Figura 38. Por otro lado, los temblores que ocurren al interior de la Placa Caribe que podría contribuir a la amenaza sísmica de la Ciudad Capital se distribuyen en las zonas sísmicas 5 a 8.

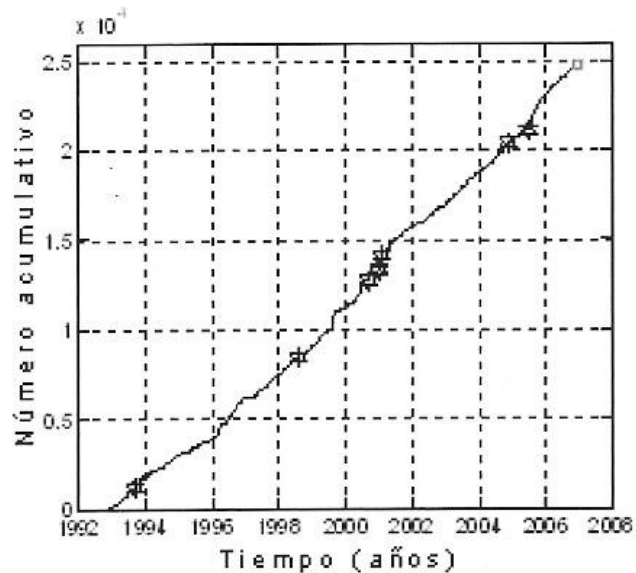
Moore (1991), expresa que los sismos originados en la Zona de Subducción representan una amenaza menor para el área de la ciudad de Managua que los originados en el sistema local de fallas.

Por su parte, Segura (1991), estableció una comparación entre dos zonas sísmicas importantes en Nicaragua: la Zona de Subducción y el Graben Nicaragüense (fuente generadora de sismos al interior del país) (Tabla 2)

	<b>Zona de Subducción</b>	<b>Graben Nicaragüense</b>
<b>Cantidad de sismos</b>	90% de los sismos	10% de los sismos
<b>Rango de profundidad hipocentral</b>	0 a 250 km	0 a 30 km
<b>Magnitud (Richter)</b>	máximas de 8	máximas de 6
<b>Frecuencia (aproximada)</b>	uno cada 130 años	uno cada 10,8 años
<b>Destruktividad</b>	El sismo máximo puede destruir varias ciudades simultáneamente.	El sismo máximo puede destruir un poblado o parte de él.
<b>Fenómenos peligrosos asociados</b>	Ondas sísmicas marinas capaces de destruir poblados costeros	Ondas sísmicas lacustres dañinas para poblados de las riberas de los lagos
<b>Energía sísmica</b>	El evento máximo es mil veces más energético que el máximo del graben	Mil veces menor en energía que el de la subducción.

Tabla 2. Comparación entre fuentes sísmicas principales nacionales.

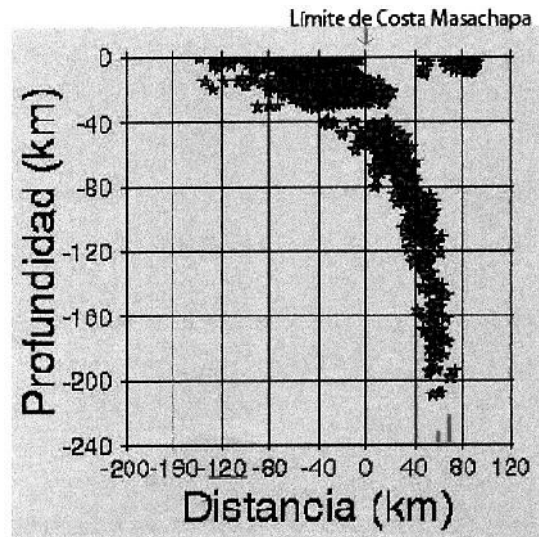
Asimismo, Segura (2008), explicó que la tasa de registro (Figura 39) de los sismos (muestra evaluada 24,761 eventos sísmicos con epicentros en Nicaragua) dentro de la Subducción no ha sufrido cambios relevantes (1992 – 2008); la mayor producción de sismos es somera (0 – 50km), salvo en algunos eventos (Sismos del Salvador en enero del 2001) por encima de los  $ML > 6.0$  con rango de profundidad entre 0 y 120 kilómetros.



Tasa de captación de sismos

Expresó, que la mayor cantidad de sismos registrados ocurrió en la parte somera de la zona de Subducción y la corteza continental a profundidades menores de 50km; refleja la cantidad de energía de deformación que se libera en la zona donde ocurre la interacción de la corteza oceánica con la corteza continental de las placas Cocos-Caribe. A profundidades mayores de 50 km la sismicidad decae suavemente hasta un poco más allá de los 200 km. (Figura 40)

Corte sísmico con origen en Masachapa. Las cruces muestran focos sísmicos en la zona de subducción



De igual manera, Moore (1991), manifestó que la descripción de la sismicidad en el área de Managua tiene su origen en dos zonas principales de actividad sísmica que la afectan:

#### Sismicidad en la Zona Wadatti-Beniof

Es la región en que entran en contacto la placa Cocos al iniciar su subducción bajo la placa Caribe, en donde se alcanza intensa actividad sísmica, sobre todo, en su zona central, ubicado horizontalmente a unos 100 km desde el eje de la Fosa Mesoamericana. En dicha zona se encuentra a una profundidad aproximada de 35 km. A su vez, esta fuente, opina que la máxima profundidad a que se detectó un evento sísmico fue de 200 km.

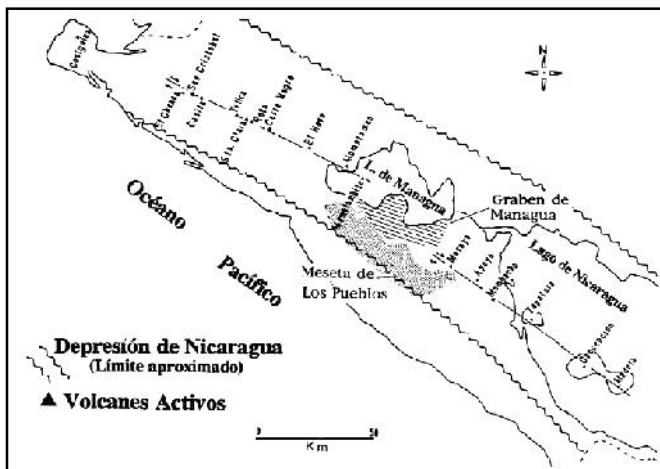
Según Moore (1991), en la zona de contacto de las placas, la placa Cocos presenta un ángulo de buzamiento del orden de  $60^\circ$  al Noreste, en que sismos de profundidades intermedias presentan considerables amenazas para poblaciones del borde pacífico de Nicaragua, particularmente, en ciudades como Managua, León, Chinandega y otros.

## Sismicidad de Focos someros continentales

Destacó, que los sismos generados en esta zona constituyen la mayor amenaza para Managua y sus pobladores. Estos sismos se caracterizan por magnitud moderada y profundidad somera, capaces de generar vibraciones en un área como Managua. Estos fuertes movimientos telúricos pueden afectar adversamente las edificaciones y obras de infraestructura ya construidas. Moore, opina que en 50 años la ciudad de Managua fue destruida en dos ocasiones (1931 y 1972), y seriamente dañada en la zona Sur (1968) a consecuencia de sismos de esta naturaleza. Aseguró, que Managua ubicado dentro de la Depresión de Nicaragua, se le asocian fallas geológicas orientadas al Noroeste, entre las que destacan las fallas de bordes del graben, que produjo el terremoto de Managua en el año 1972.

Moore, se refiere a que uno de los modelos tectónicos conocidos de la región de Managua considera que la zona de falla que pasa por la ciudad de Managua corresponde a una falla transformada entre dos segmentos de la principal cadena de volcanes cuaternarios (Figura 17). Este mecanismo asume que la depresión de Nicaragua es una zona de extensión cortical y que los centros volcánicos se alinean sobre estrechas dorsales a través de las cuales la región occidental del país esta siendo desplazada alejándose de la región oriental nicaragüense. Como consecuencia, este modelo implica la generación periódica de sismos grandes en el área de Managua, dejando de explicar la ocurrencia de sismos en toda el área del graben.

*Posición tectónica de Managua y flexión de alineación volcánica próxima*





Expresó, una segunda hipótesis considera que la actividad sísmica se concentra cerca de la depresión de Nicaragua debido a la existencia de una litósfera rígida, inusualmente delgada, por debajo de esta. La delgadez de la litósfera resulta del alto flujo calórico del manto el cual también es responsable de la extensa actividad volcánica en el occidente del país. Los esfuerzos aplicados a la placa Caribe se concentran en esta zona delgada, que une dos segmentos más gruesos de placa litosférica, corrobora este hecho, el terremoto de Managua producto de esfuerzo tensional Este-Oeste. Esta hipótesis ha sido validada por estudios realizados por McBirney y Williams (1965); Williams y otros (1964), Williams y McBirney (1969); y otros.

#### IV. Dinámica de suelos

En este documento se proponen modelos analíticos relativos a la respuesta dinámica de suelos licuables a partir de registros acelerográficos. Se detallan planteamientos dinámicos y sísmicos para distintos terrenos licuables identificados y sus factores influyentes para el área de Managua. Por último se presentan tópicos vinculados con el sismo diseño empleado, registros sísmico instrumental, la red acelerográfica local. Se proponen valores umbrales de amplitud de sismos, contenidos de frecuencias y periodos naturales de la licuefacción del suelo.

---

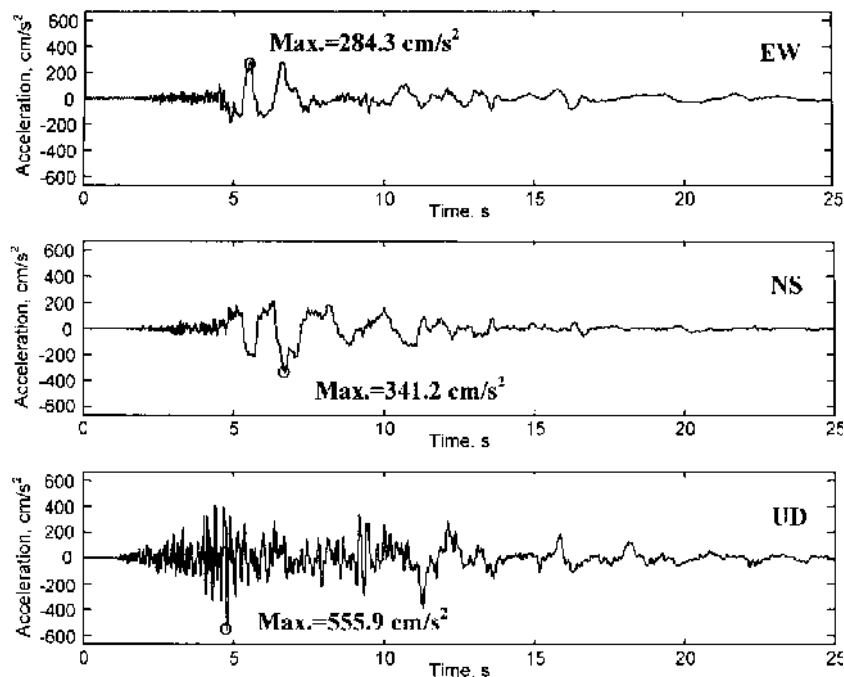
En la actualidad, muchos países altamente sísmicos recurren a registros gráficos para investigar el fenómeno de la licuefacción del suelo, entre ellos Japón, y los Estados Unidos Americanos (USA).

Básicamente, a partir de graficas de relación entre valores de aceleración del terreno y el tiempo, se da apertura para indagar la respuesta dinámica que pudiese tener un depósito de suelo al paso onda sísmica dentro del entorno geográfico considerado. En otros términos, conocer la naturaleza, comportamiento y consistencia de los materiales que componen el subsuelo local, un material blando, o bien, firme.

Sumado a esto, tenemos otro de los parámetros físicos que cobran, también, especial interés considerar dentro del análisis de licuefacción del suelo. Este es el contenido de frecuencia, y los periodos naturales del terreno, después de un sismo. Esta información es significativa y útil en la planificación y diseño de obras de ingeniería sísmo-resistentes.

De acuerdo con opinión de la Doctora Susana López Querol (MariaSusana.Lopez@uclm.es) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Castilla-La Mancha (Ciudad Real, España), considera que un registro sísmico, en definitiva, es un resumen de las características geológicas de cada emplazamiento considerado. (Comunicación telemática, fecha del 02/04/2009).

Para efectos de zonificar la licuefacción en el área de Managua se recurre a los acelerogramas resultantes del Terremoto de Hyogoken-Nanbude en Japón (1995), permitiendo, a su vez, la visualización de la respuesta que tienen los terrenos licuables en un medio sísmicamente activo y su relación con nuestra realidad capitalina en Managua.



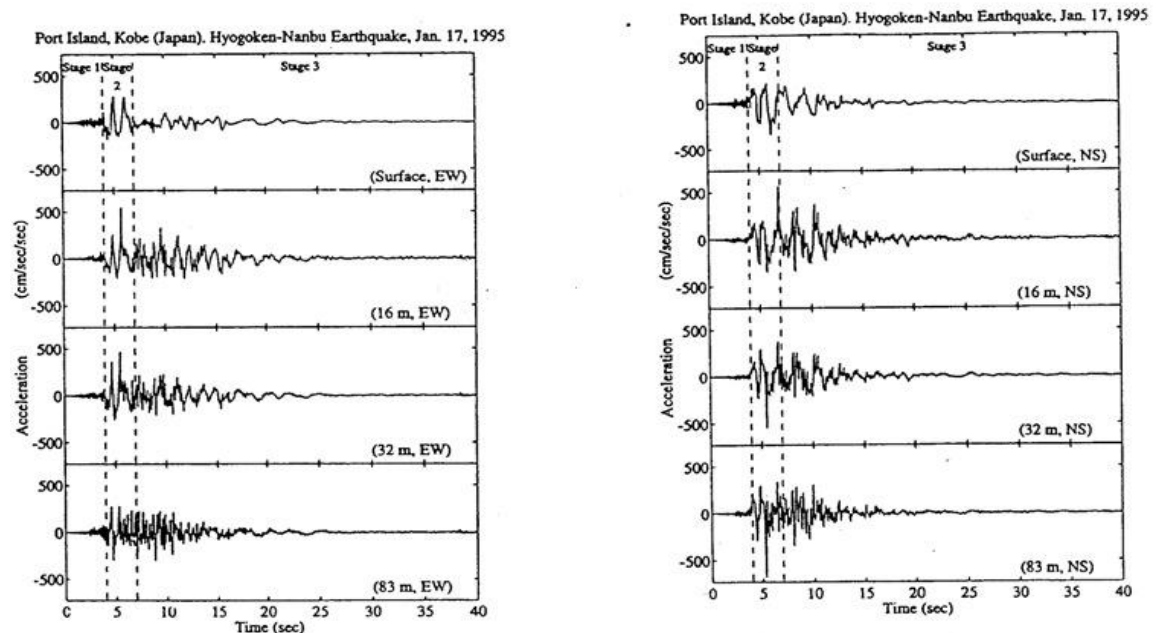
Espectro de respuesta de aceleraciones representativo del emplazamiento en Port Island, luego del terremoto de Hyogoken-Nanbude en Japón (1995)

Según Vallejos (2,002), el acelerograma de un terremoto (representación gráfica de la variación de la aceleración con el tiempo registrada por un acelerógrafo) permite, mediante una integración numérica, calcular la aceleración máxima para un amortiguamiento específico y un periodo dominante.

Esta misma fuente, opina que la representación de estas aceleración máximas en función del periodo constituye el denominado espectro de respuesta del terreno, que indica la amplificación del movimiento del terreno con respecto a la aceleración, velocidad, o desplazamiento. El espectro de respuesta se utiliza para el diseño sismorresistente de estructuras, siendo necesario que el espectro de respuesta del movimiento del suelo no exceda al diseño de la estructura.

Según García Nuñez (2,007), unos de los muchos sectores donde ocurrió licuación de arenas que se encontraba instrumentado corresponde a la ciudad de Kobe, durante el sismo Hyogoken-Nanbu ocurrido en 1995. En este sector, se instalaron acelerómetros

localizados en superficie, 16 m , 32 m y 83 metros de profundidad. Los registros obtenidos para las componentes E-W y N-S se ilustran en la figura que sigue.



Registro de los componentes N-S y E-W a diferentes profundidades.

Luis González Vallejos en su libro titulado Ingeniería Geológica, refiere que las características sísmicas de un terremoto determinado, definidas por su acelerograma, puede ser modificada por las condiciones locales (tipo de suelo, topografía, entre otros), originando una respuesta sísmica amplificada con respecto a las definidas en el terremoto seleccionado.

Los factores que mayor influencia tienen en la modificación de la citada respuesta es:

- EL tipo y composición litológica de los materiales, en especial los depósitos superficiales cuyo comportamiento geotécnico corresponde al de suelos.
- El espesor de sedimentos y la profundidad del sustrato rocoso o resistente.
- Las propiedades dinámicas de los suelos
- La profundidad del nivel freático
- La topografía, tanto superficial como del sustrato

- La presencia de fallas, su situación y características.

Sumado a ello, las condiciones locales propias de cada emplazamiento son importante, debido a que determinan que se produzcan entre otras cosas, la licuefacción de suelos.

Por otro lado, hay que destacar que la intensidad de los sismos en sus distintos niveles tienen incidencia en la respuesta del terreno. Entre una de las propuestas a estos niveles fue desarrollada por las centrales nucleares. No obstante, este concepto ha ido generalizando en distintos países de la región, entre estas propuestas está la U.S. Atomic Energy Commission, que define de este modo: Operating Basis Earthquake (OBE) que refiere a sismos de operación; y Safe Shutdown Earthquake (SSE), que refiere al sismo accidental.

Los sismos de operación, se definen como aquellos sismos de magnitud moderada, pero con posibilidad de ocurrencia relativamente alta. Por su parte, los sismos accidentales, se definen aquellos evento de gran magnitud, pero de ocurrencia esporádica; el terremoto más fuerte que se espera se produzca durante la vida e una estructura.

De acuerdo con Parrales et. al. (2001), estas definiciones han sido aplicadas en un sentido más general para expresar los niveles de la acción de los terremotos en otros tipos de estructuras. El sismo de operación es un sismo de magnitud moderada que puede ocurrir varias veces durante la vida de una estructura. La estructura debe resistir su acción sin que sufra daños importantes que la pongan fuera de uso. La reparación de daños debe tener un costo razonable. El sismo accidental es el terremoto más fuerte que se espera ocurra una sola vez durante la vida de una estructura. Se tiene justificación económica de aceptar que un terremoto con estas características produzcas daños estructurales importantes, siempre que al mismo tiempo, se evite el colapso de la construcción, las pérdidas de vidas y de bienes materiales.

Esta fuente, opina que los efectos de los temblores en un sitio y la respuesta de una estructura son determinados por la aceleración máxima, también depende de las características de la frecuencia de los movimientos del terreno y de su duración.

No obstante, las aceleraciones del terreno inducidas por un temblor tiene dependencia de los valores de la magnitud y profundidad del terremoto.

Para efecto de generar condiciones sísmicas comparables al terremoto de Managua de 1972, se establece profundidad de sismos de 5 km con valores de magnitud Richter de 6.2 y 7.8 para sismos operativo y accidental, respectivamente.

La magnitud de los sismos propuestos, siendo los máximos valores medidos, resultan de la historia sismológica hasta la fecha conocida en Managua, tal como figura en la Tabla No x.

Historia sísmica en Managua

AÑO	MAGNITUD RICHTER
1876	5,3 - 5,99
1907	5,3 – 5,99
1928	5,3 – 5,99
1931	5,6
1968	4,6
1972	4,2
1972	6,2

Sin embargo, según los estudios científicos realizados por especialistas en sismología, sugieren valores para sismos máximos posible en la ciudad de Managua no superiores a 7,8 grados de magnitud Richter, tal como se ilustra en la Tabla

Magnitud máximas calculadas para Managua

Autores	Magnitudes		Observaciones
	Máxima Probable	Máxima Posible	
Saint- Amand (1973)	6,0 – 6,5		Saint- Amand (1973)
Niccua et. al. (1973)	6,5		Johansson (1988)
Woodward Clyde (1975)	6,0 – 6,25	6,75 – 7,25	Woodward Clyde (1975)
Shah et. al. (1975)	6,50		Shah et. al. (1975)
Argeñal (1981)	6,90	6,70	Johansson (1988)
Moore y Maltéz (1982)	6,40	7,50	Larsson y Mattson (1987)
Zapata (1984)	6,20		Zapata (1984)
Larsson y Mattson (1987)		7,00	Larsson y Mattson (1987)
Montero (1990)		6,50	Montero (1990)
Ordaz y Miranda (1996)	6,50		Ordaz y Miranda (1996)
Segura y Rojas (1996)	6,20		Segura y Rojas (1996)

Después de presentar datos cuantificados de la sismicidad de Managua se proponen sismos operativos y accidentales que permiten la representación gráfica de la aceleración del terreno para distintos sitios de la capital, siendo estos vinculados a terrenos licuables por las sollicitaciones dinámicas al que es sujeto el subsuelo.

#### Modelo I. SISMO OPERATIVO

Magnitud: 6,2 grados Richter

Aceleración máxima en Roca: 0,292g

Profundidad del sismo: 5 km

Periodo dominante: 0,27 segundos

Duración: 16 segundos.

#### Modelo II. SISMO ACCIDENTAL

Magnitud: 6,75 grados Richter

Aceleración máxima en Roca: 0,377g

Profundidad del sismo: 5 km

Periodo dominante: 0,3 segundos

Duración: 16 segundos.

En este Estudio se decidió seleccionar el Modelo II (Sismo Accidental) para Managua, en vista que representa el máximo evento esperable en nuestro entorno geográfico, permitiendo su consideración en los actuales diseños de obras civiles sismorresistentes. Con ello, se contribuye al fortalecimiento y/o ampliación de los modelos teóricos, gráficos y matemáticos contenidos en el Reglamento Nacional de la Construcción (RNC-1997), vigente hasta la fecha en nuestro país.

Los registros gráficos (o, Acelerogramas) de sismos de movimiento fuertes medidos para el área del Estudio, propuestos a continuación, tienen características comparables en contenido de frecuencias, periodos naturales y aceleraciones del terreno con registros acelerográficos en terrenos licuables resultante del terremoto de Japón de 1995 tal como se ilustra en la Figura x.

En el mapa que sigue se ubican sitios licuables al Noroeste y Sur de la Ciudad de Managua siguiendo orden numérica propuesto desde el No 1 hasta el No 9 acompañado de su correspondiente espectro de respuesta de aceleración del terreno, los cuales son



representados gráficamente a partir de Sismo Accidental de 6,75 grados de magnitud Richter.

La modelación de los Espectros de Respuesta solicitan la aplicación de programas informáticos como SHAKE91 disponible electrónicamente en Website: <http://sarvis.dogami.state.or.us/eq/PSU/sse/shakmanl.html>

Los datos aquí presentados corroboran los planteamientos propuestos por INETER (1,997), quienes consideran que las mayores amplificaciones correspondientes a picos de frecuencias característicos, se encuentran concentrados en la parte Oeste de Managua, lo cual tiene estrecha coincidencia con la geología e información histórica sobre terremotos fuertes que han ocurrido en el área de Managua. Según la fuente, el rango de frecuencias está entre 4 y 5 Hz, que corresponde con las frecuencias naturales de edificio de dos y tres pisos. Estos datos son correlacionables con la geología, y tectónica del Oeste de Managua. Las amplificaciones ocurren principalmente a frecuencias por debajo de los 10Hz.

A su vez, es preciso destacar que es importante considerar la información sobre las características del suelo cuando se va diseñar y construir estructuras resistentes contra terremotos en áreas sísmicas. Las estructuras no deben ser construidas con la misma frecuencia de resonancia del perfil de suelo donde están erigidas.

Para efecto de establecer zonas anómalas o de afectación respecto a la licuefacción del suelo producto del cálculo de espectro de respuesta de aceleración del terreno se analizaron y emplearon acelerogramas sísmicos tal como se ilustra más adelante.

A su vez, establecer el rango de frecuencias características, y periodos naturales para zonas de afectación.

Por su parte, Del Valle (1,973) en su reporte sobre los daños encontrados en la ciudad de Managua a raíz de temblores de diciembre de 1,972, opina que el movimiento fue intenso en toda la ciudad, con mayores amplitudes en la zona Sudeste de la misma, lo que induce a pensar que en algunos lugares las aceleraciones fueron del orden 50% de la gravedad. Esta información es corroborada por Moore (1,990), quien dice que en la zona central Norte así como la zona Noroeste de la ciudad, se dan las aceleraciones máximas entre 320 y 400 gals.

Hay que destacar que el estudio de los movimientos fuertes de gran intensidad sísmica se realiza mediante una instrumentación sismográfica especializada, sofisticada y mayor aplicación actualmente, denominado Acelerografos, máquina que registra la aceleración del terreno expresada como fracción de la gravedad terrestre en dominio del tiempo. Hoy día, los acelerógrafos son utilizados por los ingenieros para medir el comportamiento de edificios, puentes y otras estructuras excitadas por un sismo.

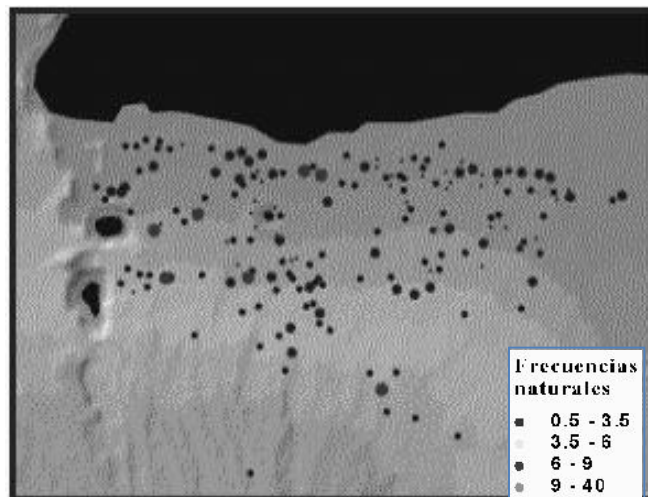
Mapa de Managua

▲ Acetabularia

INETER (2000), advierte que al investigar la amplificación del suelo en Managua, no se pudo identificar área extensa alguna, en donde se presenten amplificaciones extremas con factores arriba de 3.

Esta fuente, opina que las frecuencias que corresponden a la amplificación máxima, se ubican en la gran mayoría de los sitios investigados en el rango de frecuencias altas, arriba de 8 Hz. Estas frecuencias tienen importancia para construcciones bajas, de un piso. Construcciones importantes, peligrosas cuando colapsan durante un terremoto, se elevan generalmente a 3 pisos o más. Estos edificios tienen frecuencias de resonancia de menos de 3.5 Hz.

Según INETER (2000), en comparación con el Este de la ciudad, existen tendencias de mayor amplificación del suelo y, para frecuencias menores, en el Oeste de Managua; pero, tales tendencias reflejan únicamente efectos menores, tal como se ilustra en la Figura No xxx



Frecuencias naturales del suelo, sobre todo, al Oeste de Managua

Por su parte, CIGEO (2,008)\*, proponen la estación sísmica UNAN-Managua de referencia nacional para el estudio de la respuesta sísmica de los depósitos de suelos. Esta estación facilita el estudio de la propagación de ondas sísmicas, y efecto de sitio, a la vez, permite conocer las propiedades del subsuelo, tales como: amortiguamiento y modulo de rigidez. Esta misma fuente, consideran que para estudiar el efecto sísmico causado por la propagación de ondas en áreas altamente activas las estaciones de monitoreo hacen uso de acelerógrafos. Estos registran las componentes de las aceleraciones del suelo en función del tiempo generalmente se usa para detectar terremotos fuertes.

CIGEO (2,008)\*, quienes son del criterio que con el desarrollo de la tecnología, las estaciones sísmicas tienden a ser más sofisticadas, lo que ayuda a la obtención de mejores datos, siempre y cuando se ubiquen en sitios apropiados. Estas estaciones han adquirido un nuevo concepto: “arreglo vertical”, el cual consiste de un acelerógrafo

digital localizado en superficie el que a la vez se acopla con sensores ubicados en profundidad a través de un pozo perforado inmediatamente debajo de la estación en superficie.

Según CIGEO (2,008)\*, el objetivo primordial es registrar eventos sísmicos a diferentes profundidades. Para instalar la estación, previamente se caracterizó el área donde se pretendía ubicarla, pues está comprobado que las condiciones del subsuelo pueden presentar algún tipo de efecto local, en cuyo caso los sismos registrados tendrían algunas limitaciones al usarlos como movimientos de referencia en estudios de respuesta sísmica local para poblaciones y áreas cercanas a ellas. De ahí que el proceso de caracterización de sitio es clave para garantizar la buena calidad de la información obtenida.

Es preciso señalar, que el subsuelo de la capital Managua se caracteriza por una secuencia de sedimentos y productos volcánicos del Holoceno al Pleistoceno Tardío. En este sentido, es bien conocido, que en suelos sedimentarios o suaves se producen “efecto de sitio”, es decir, amplificación de las ondas sísmicas debido a las condiciones geológicas del área., comportamiento que multiplica los daños estructurales durante los terremotos. (CIGEO, 2,008)\*\*

A su vez, CIGEO (2,006), opinan que el efecto de sitio permite conocer la respuesta del suelo o sitio en sus modos de vibrar ante un evento sísmico.

## Zonas potencialmente licuables reconocidas mediante acelerogramas de respuesta del suelo

### Espectro de Respuesta I

Ubicación geográfica: LINDA VISTA

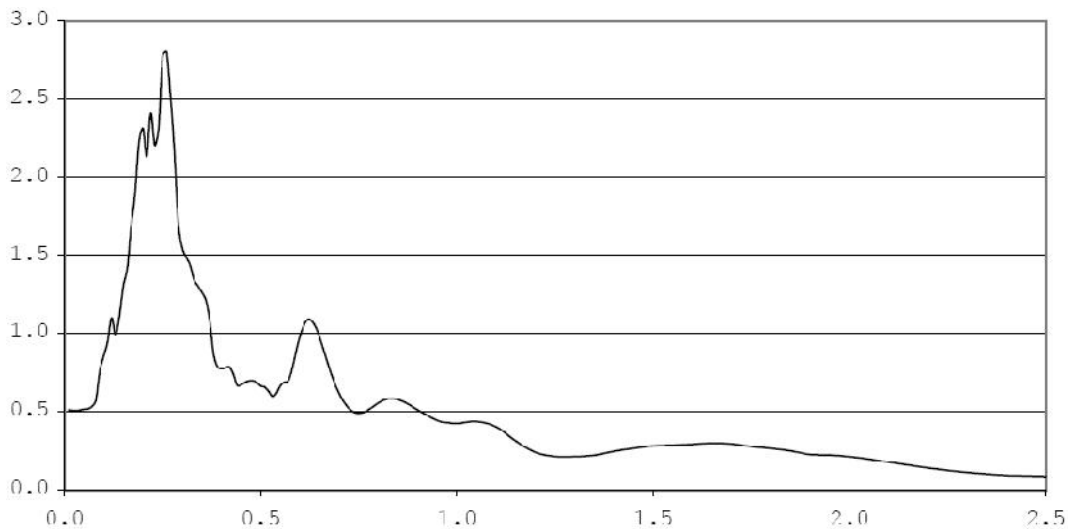
Parámetros sísmicos:

Máx. valor de aceleración del terreno:  $2,801\text{m/seg}^2$

Contenido de frecuencia: 3.85 c/seg

Periodos naturales dominantes: 0.26seg

Cociente Espectral: 0,76 ( 76% de posibilidad alta de amplificación  
del suelo)



### Espectro de Respuesta II

Ubicación geográfica: JULIO MARTINEZ

Coordenadas UTM: N1343400 – E577700

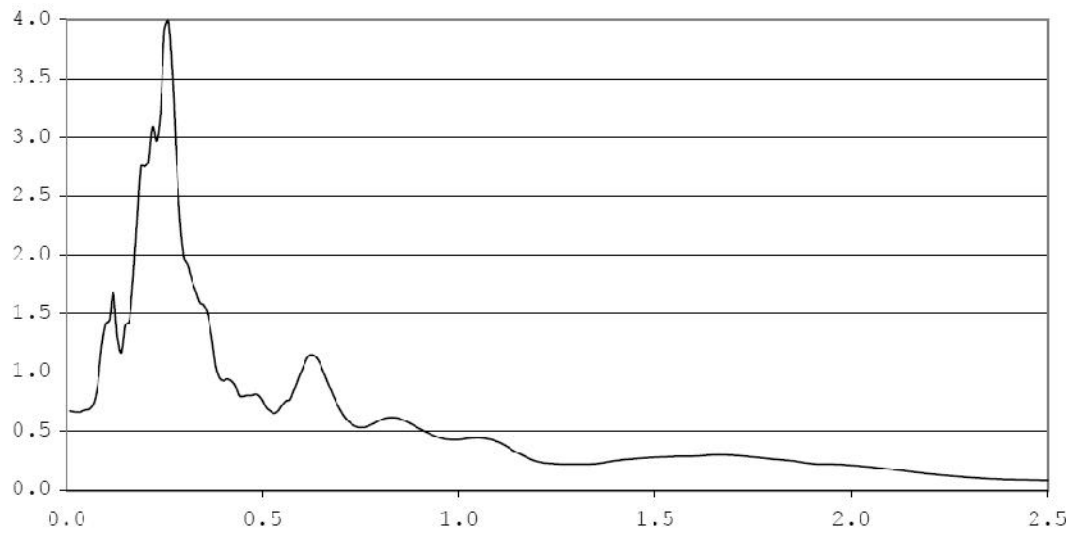
Parámetros sísmicos:

Máx. valor de aceleración del terreno:  $3,984\text{m/seg}^2$

Contenido de frecuencia: 3.85 c/seg

Periodos naturales dominantes: 0.26seg

Cociente Espectral: 1,01 (terreno totalmente amplificado)



### Espectro de Respuesta III

Ubicación geográfica: PROYECTO AGUAS SERVIDAS

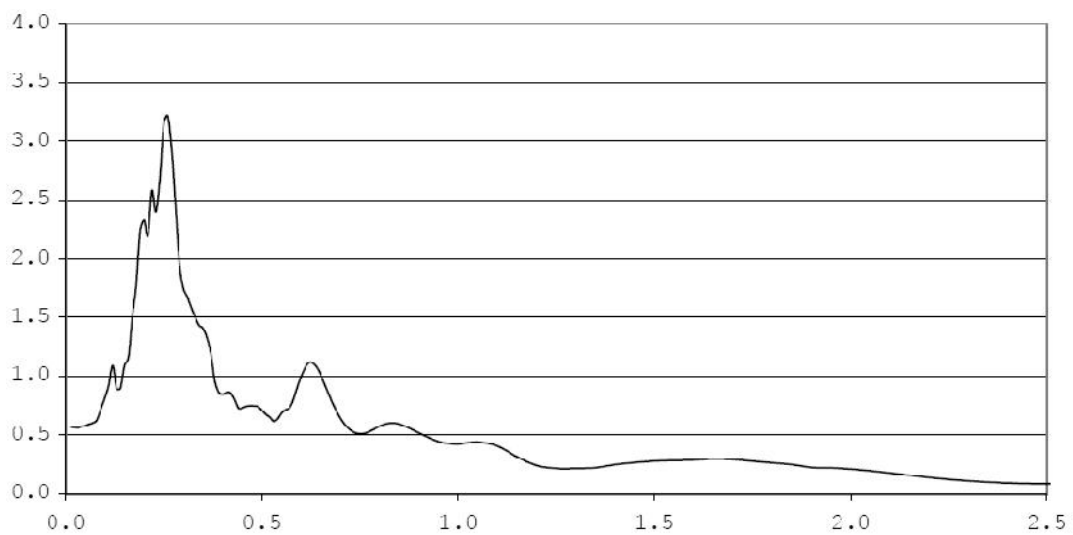
Parámetros sísmicos:

Máx. valor de aceleración del terreno:  $3,215\text{m/sec}^2$

Contenido de frecuencia: 3.85 c/seg

Periodos naturales dominantes: 0.26seg

Cociente Espectral: 0,87 (alta posibilidad de amplificarse)



#### Espectro de Respuesta IV

Ubicación geográfica: TEATRO RUBÉN DARÍO

Coordenadas UTM: N1344000 – E579200

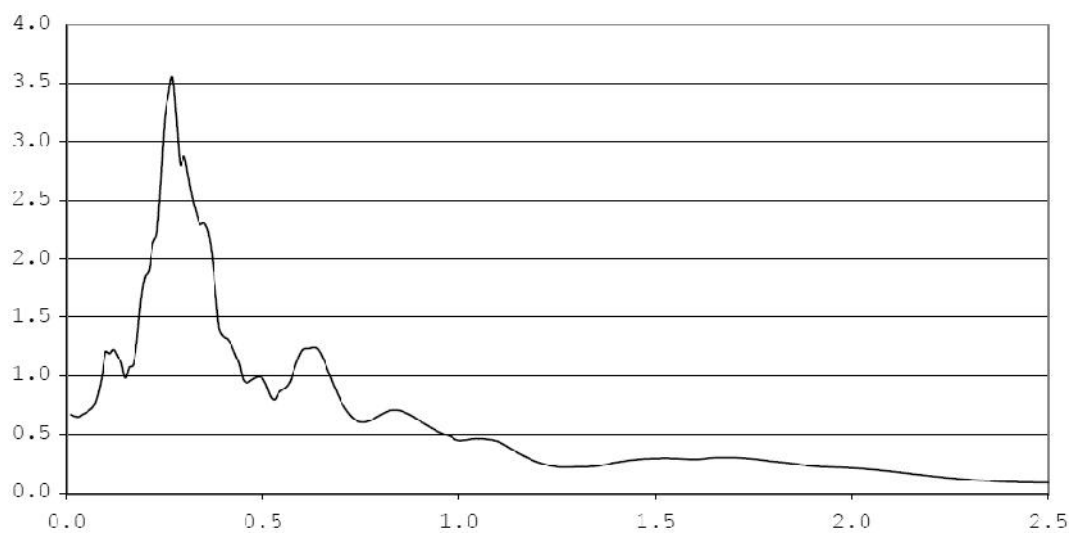
Parámetros sísmicos:

Máx. valor de aceleración del terreno:  $3,545\text{m/seg}^2$

Contenido de frecuencia: 3.70 c/seg

Periodos naturales dominantes: 0.27seg

Cociente Espectral: 0,96 (terreno totalmente amplificado)



#### Espectro de Respuesta V

Ubicación geográfica: EDIFICIO SILVIO MAYORGA

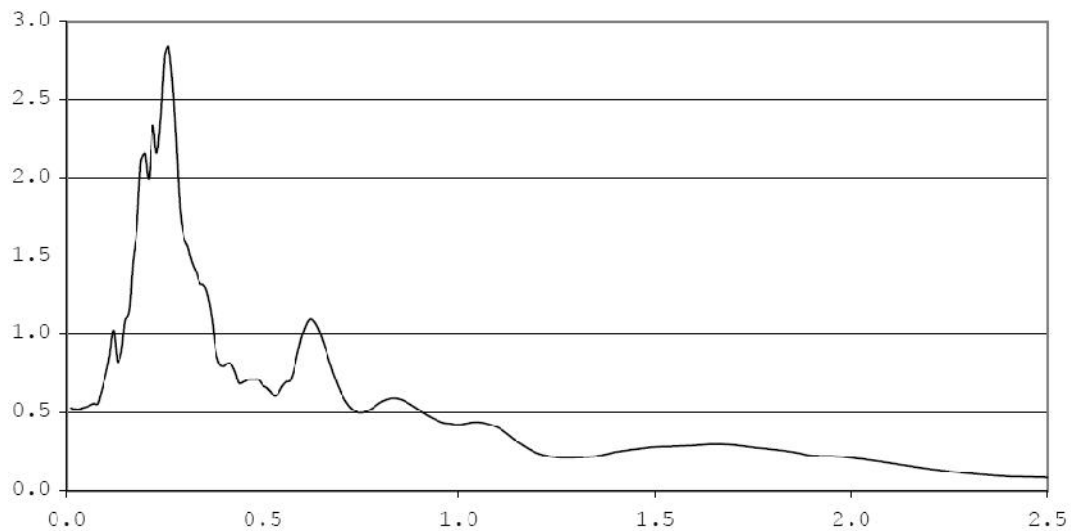
Parámetros sísmicos:

Máx. valor de aceleración del terreno:  $2,838\text{m/seg}^2$

Contenido de frecuencia: 3.85 c/seg

Periodos naturales dominantes: 0.26seg

Cociente Espectral: 0,77 (suficientemente posible la amplificación terreno)



#### Espectro de Respuesta VI

Ubicación geográfica: SAN ISIDRO

Coordenadas cartográficas: N1335000 – E581000

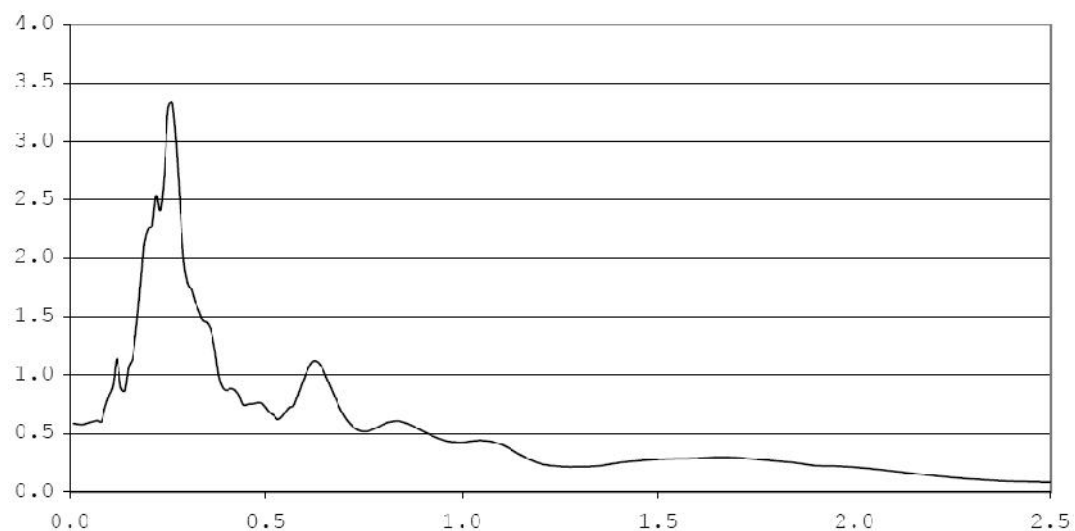
Parámetros sísmicos:

Máx. valor de aceleración del terreno:  $3,337\text{m/seg}^2$

Contenido de frecuencia:  $3,85\text{c/seg}$

Periodos naturales dominantes: 0.26seg

Cociente Espectral: 0,90 (Terreno completamente amplificado)



#### Espectro de Respuesta VII

Ubicación geográfica: ALTOS DE SANTO DOMINGO

Parámetros sísmicos:

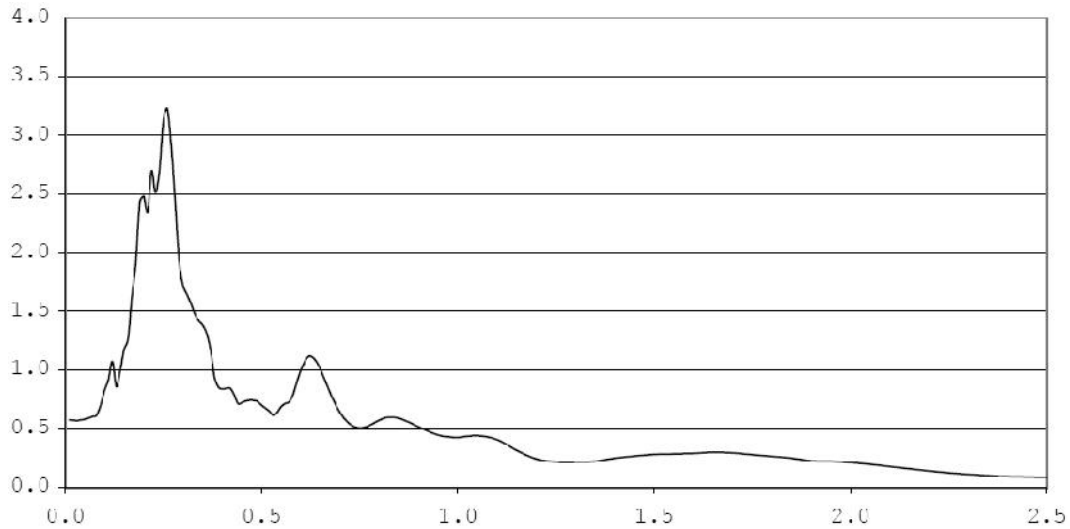


Máx. valor de aceleración del terreno:  $3,225\text{m/seg}^2$

Contenido de frecuencia:  $3,85\text{c/seg}$

Periodos naturales dominantes:  $0,26\text{seg}$

Cociente Espectral:  $0,87$  (Alta posibilidad de amplificación del suelo)



### Espectro de Respuesta VIII

Ubicación geográfica: ALTAGRACIA

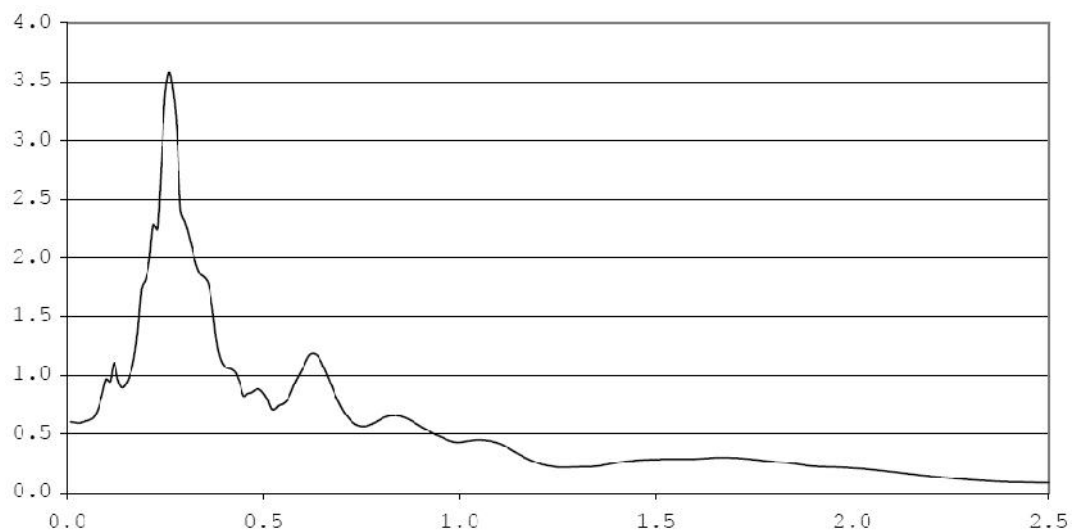
Parámetros sísmicos:

Máx. valor de aceleración del terreno:  $3,575\text{m/seg}^2$

Contenido de frecuencia:  $3,85\text{c/seg}$

Periodos naturales dominantes:  $0,26\text{seg}$

Cociente Espectral:  $0,97$  (Totalmente suelo amplificado)



## Espectro de Respuesta IX

Ubicación geográfica: UNAN-RURD

Coordenadas UTM: N1338100 – E579500

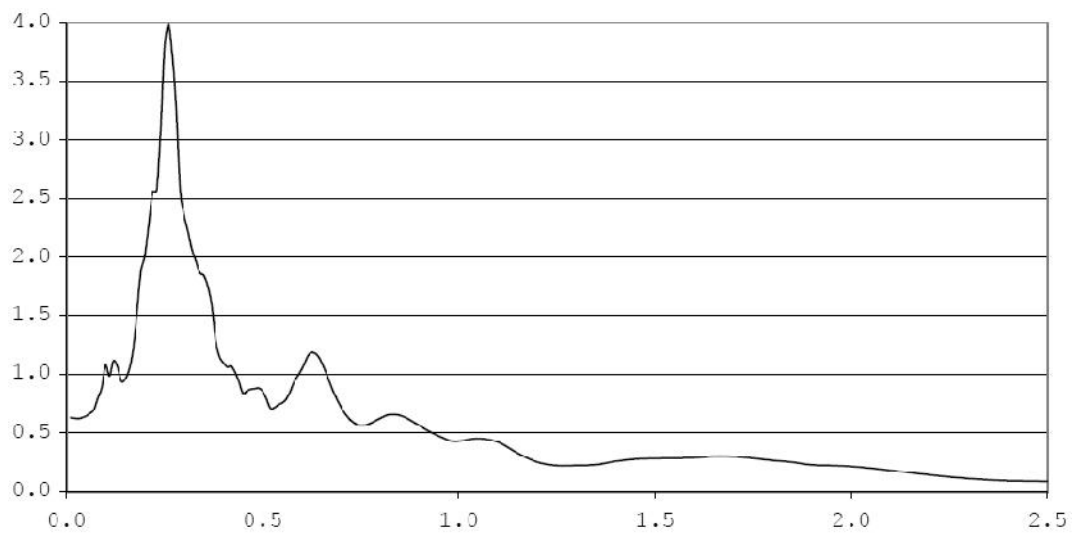
Parámetros sísmicos:

Máx. valor de aceleración del terreno:  $3,980\text{m}/\text{seg}^2$

Contenido de frecuencia:  $3,85\text{c}/\text{seg}$

Periodos naturales dominantes:  $0.26\text{seg}$

Cociente Espectral: 1,01 (suelo bajo efecto amplificación)



## V. Conclusiones

### **Geología**

A modo de síntesis se presenta resumen de los aspectos relevantes propuestos en este capítulo:

Managua presenta relieve plano y bajo orientado hacia el lago Xolotlán (como es conocido cuerpo de agua superficial a menos de 40msnm) acompañado de cerros y lagunas volcánicas como Tiscapa, Nejapa, Asososca y otras.

La geología capitalina está constituida por materiales fragmentarios tipo volcánicos (cenizas, pómez, arenas, basaltos, tobas y otros) y sedimentarios, ambos proclives a erosionarse en superficie o profundidad por el agua, o bien por el viento, siendo esto valido especialmente para los suelos limosos, arcillosos y/o gravoso cuyo comportamiento físico mecánico es desde ligero a intensamente heterogéneo y complejo. El depósito Vulcano-sedimentario que constituye la estructura de Managua no supera los 10 metros de potencia.

Los depósitos arenosos en la Ciudad de Managua, a igual que en las minas no metálicas son elementos constitutivo principal de la estructura geológica del terreno, y a su vez, el factor importante y contribuyente para la generación y efectividad al desarrollo de la licuefacción ante solicitaciones dinámicas. Todo ello, depende de la forma y tamaño de las partículas arenosas (granulometría), composición mineral, propiedades físicas y potencia de las capas en profundidad.

Palabras claves: Geotecnia, Grupo La Sierra, columna estratigráfica, Grupo Managua, comportamiento dinámico de suelos, abanicos aluviales.

## **Geotecnia**

Se presenta en este documento breve sinopsis de los detalles relevantes e importantes planteados en esta parte:

El conocimiento geotécnico del subsuelo hasta la fecha aceptado procede de poco más o menos 2,000 ensayos de campo con la Prueba de Penetración Estándar (SPT, siglas en inglés), de donde resultan insumos para el análisis de las propiedades y comportamiento dinámico y mecánicos en Managua.

Los ensayos en el terreno proporcionan información completa y confiable relativa al números de golpes suministrado al suelo (este parámetro de resistencia oscila entre 10 a 50), velocidad de Onda de Corte (para nuestro caso, las velocidades varían entre 180m/s hasta 750m/s), Modulo cortante y Clasificación del tipo de material (variando entre afloramiento rocoso duro y compacto hasta suelo muy blando). La clasificación del material se realiza cumplimiento con la normativa construcción vigente en el país.

En algunos casos los parámetros dinámicos del subsuelo antes referido son obtenidos a través de modelos matemáticos propuestos, o bien, pudiese conseguirse a través de experimentaciones en laboratorio geotécnico.

**Palabras claves:** Sondeos geotécnicos, ensayo de penetración estándar (SPT), velocidad de corte, módulo cortante, compacidad relativa, consistencia de suelos, índice de plasticidad, estado de degradación de la rigidez de los suelos.

## **Sismología**

Se presenta en este capítulo breve sinopsis de los detalles relevantes e importantes planteados en esta parte:

La mecánica sísmica en la Ciudad de Managua resulta de la convergencia de placas tectónicas Cocos y Caribe (Zona Wadatti-Beniof), o bien, por la rotura y desplazamiento del terreno que da origen a la denominación de Falla Geológica (Graben de Nicaragua y/o Cadena volcánica nacional).

Estas fuentes sismo-generadoras complican la vida urbana de la ciudad capital por la ocurrencia de sismo somero (menores de 50 km) con magnitudes y/o intensidades relativamente significativas (mayores o iguales a 6) capaces de ocasionar daños físicos a las obras de ingeniería civil construidas o en fase de construcción.

**Palabras claves:** Ambiente sísmico, tectónica, proceso de subducción, Graben Nicaragüense, Zona Wadatti-Beniof, falla geológica, esfuerzo tensional.

## **Dinámica de Suelos**

Se presenta en este capítulo breve sinopsis de los detalles relevantes e importantes planteados en esta parte:

La respuesta del terreno, como resultado de la acción del sismo de base accidental, se expresa en aceleraciones mínimas y máximas del suelo en un rango de  $2,801 \text{ m/seg}^2$  a  $3,984 \text{ m/seg}^2$ , siendo los lugares más afectados LINDA VISTA y JULIO MARTINEZ.

Los periodos naturales estimados oscila entre 0,26 y 0,27 segundos; En la mayoría de los acelerogramas evaluados, los periodos no superan los 0,26 segundos. A su vez, el contenido de frecuencia esperado varía entre 3, 70 y 3,85 c/seg.

Los depósitos de suelos de Altagracia, UNAN-RURD y Teatro Nacional con periodo naturales de 0,26s, 0,26s y 0,27s tienen posibilidad de entrar en Resonancia, por el hecho que el valor de periodos predominante del sismo accidental seleccionado se asemejan mucho a estos. Este sismo accidental tiene un periodo importante de 0,3s.

Los Cocientes Espectrales calculados oscilan entre 0,76 y 1,01, siendo el máximo valor medido de 1,01. Esto significa terrenos licuables altamente susceptibles a efectos de amplificación en su plenitud (100%). Esto se espera ocurra en dos importante lugares como son UNAN-RURD, y Edificio JULIO MARTINEZ.

## I.

A partir de los datos obtenidos, se solicita a ingenieros constructores considerar esta información en la planificación y diseños de obras civiles sismorresistente. Las estructuras en fase de construcción deben evitar ser erigidas en frecuencias de resonancia similares al perfil del suelo para aminorar daños estructurales a la misma, sobre todo, salvaguardar la vida humanas, y reducir pérdidas de bienes materiales.

Por último, el Fenómeno de Resonancia, es definido por algunos especialista como Sauter (1,989) como aquel efecto en que las características y profundidad del suelo subyacente tiene consecuencias significativas sobre la intensidad de la sacudida y la severidad de los daños. Las ondas sísmicas pueden ser amplificadas a través de los estratos de suelos aluviales blandos y la respuesta de los edificios puede aumentar considerablemente si el periodo natural de vibración de los mismos coincide con el periodo predominante de la columna de suelo, dándose la Resonancia. Para mayor información sobre este tema recurrir a la fuente bibliográfica ya referida.

Palabras claves: Espectro de respuesta, aceleración del terreno, contenido de frecuencia, periodos naturales, sismo accidental, cociente espectral, resonancia, terrenos licuables, amplificación.

## Referencia

Obando, T. (2,009). Modelación geomecánica y temporal de la licuefacción en suelos de minas no metálicas. Estudio Caso: Ciudad de Managua (Nicaragua). Tesis Doctoral. Editorial Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España). Huelva. 900pág.

## I.

### Anexos

#### **Anexo No. 1.** Ensayos Experimentales de Geotecnia, sus ventajas y limitaciones.

Para estudiar un material complejo como el suelo (con diferente tamaño de partículas y composición química) es necesario seguir una metodología con definiciones y sistemas de evaluación de propiedades, de forma que se constituya un lenguaje fácilmente comprensible por los técnicos de diferentes especialistas y países. En este documento se presentan breves reflexiones la finalidad de los ensayos de laboratorio (Foto No 1), sus ventajas y limitaciones, tipología de pruebas experimentales, condiciones de aplicación, entre otros.



Laboratorio para análisis de Mecánica de Suelos y Rocas. (Foto T. Obando)



¿Qué métodos aplicamos?

La metodología para el análisis del comportamiento de un suelo frente a las acciones exteriores (como cimentaciones de edificios, excavaciones, etc.) es la siguiente:

- Identificación del tipo de suelo, determinando su granulometría y plasticidad, a lo que se añade el contenido de  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CO}_2$ , y materia orgánica, todo ello a través de sencillos ensayos de laboratorio

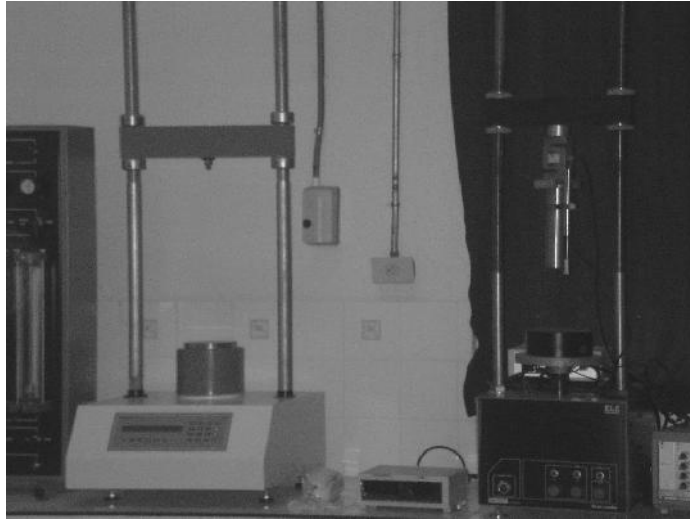


Equipos para ensayos granulométricos. (Foto

T. Obando)

- Determinación de su estado real (los ensayos anteriores se hacen secando y disgregando la muestra, sin conserva su estructura inicial) esto, es de las proporciones relativas de sólidos, agua, etc.

- A partir del estado real, teniendo en cuenta, además, su estado tensional inicial, ha de estudiarse la respuesta del suelo frente a los cambios que, en este estado, inducen las acciones exteriores.



Maquinas para el ensayo de resistencia mecánica.

(Foto T. bando)

### III. ¿Cuáles son las beneficios, y limitaciones de la metodología?

Los ensayos de laboratorio tienen las principales ventajas:

- Es un ensayo rápido y barato
- Sus principios básicos son elementales
- Preparación de muestra es sencilla
- Se pueden ensayar materiales de grano grueso

Los ensayos de laboratorio (Foto No 3) se realizan sobre probeta cilíndricas de roca. Por lo general se utilizan testigos de sondeos, por lo que las dimensiones de las probetas suelen ser siempre pequeñas. Los ensayos deben ser realizados de una forma sistemática y los resultados deben ser estadísticamente representativos de la roca a investigar.

Su ventaja es que son más asequibles que los ensayos de campo, y puede realizarse un gran número de ellos en condiciones variables. Sin embargo, los ensayos de laboratorio y los resultados que a partir de ellos se obtienen presentan una serie de limitaciones a la hora de extrapolar los datos a escala de materiales geológicos, relacionados con los siguientes aspectos:



Máquinas para ensayos de laboratorio. (Foto T. Obando)

✚ Representativa. Las muestras que se ensayan corresponden a puntos aislados, no siendo representativos de todo el conjunto ni de la variabilidad de factores presentes en la naturaleza, y que condicionan los comportamientos de los materiales, de ahí la importancia de realizar un número de ensayo estadísticamente representativo. En mucho de los casos las condiciones ambientales en que se encuentran las muestras son difíciles de reproducir en laboratorio.

✚ Escala. Se ensayan pequeñas porciones de material, a partir de las cuales se pretende la caracterización y la predicción del comportamiento de ámbitos más amplios. La diferencia con las escalas y comportamientos reales hace necesaria la utilización de factores de conversión o correcciones para extrapolar los resultados a escala de la muestra.

🚦 Velocidad. Los procesos de deformación y rotura se reproducen en laboratorio generalmente en unos pocos minutos, mientras que en la naturaleza estos procesos pueden ser el resultado de condiciones y acciones a lo largo de periodos muy dilatados de tiempo.

Si estos aspectos se añade la influencia de otra serie de factores relacionados con la ejecución de los ensayos, como el tipo y características de la máquina utilizada, la preparación de las probetas, etc., se entenderán las limitaciones y dificultades asociadas a la caracterización de las propiedades de las muestras a partir de ensayos de laboratorios. Los resultados sólo son aplicables a la zona afectada por el ensayo. Sin embargo, su mayor ventaja es que se realizan sobre la propia muestra.

#### IV. ¿En qué condiciones aplicamos el método?

El ensayo se realiza sobre un cilindro de roca, al que se aplica gradualmente fuerza axial hasta que se produce la rotura.

Los ensayos de laboratorio son necesarios para determinar las propiedades de las rocas, constituyendo uno de los aspectos más importantes de la mecánica de roca. El tipo y número de ensayos a realizar depende, principalmente, de la finalidad de las investigaciones y del proyecto; el tamaño, número y lugar de procedencia de las muestras a ensayo depende del problema de ingeniería geológica a resolver y de los condicionantes económicos.

Los valores obtenidos dependerán de la naturaleza y condiciones de roca, y de las condiciones del ensayo (forma y volumen de la probeta, preparación y

tallado de la misma, contenido de humedad, temperatura, velocidad de carga, dirección de aplicación de carga, rigidez de la máquina de ensayo.

Los ensayos de laboratorio no proporcionan propiedades de los materiales geológicos, aunque aportan valores que a veces pueden ser extrapolados o correlacionados con las propiedades fundamentalmente mismo.

## **Anexo No. 2.** Cómo trabajan juntos los Ingenieros y Científicos Geólogos

Hay una vieja máxima que dice “los científicos descubren cosas y los ingenieros las hacen trabajar”. Al igual que muchas viejas máximas parecidas, hay una pizca de verdad en esa afirmación, pero ya está pasada de moda. Desde el punto de vista educativo, la ingeniería geológica se basa en las ciencias geológicas. Ésta proporciona las teorías básicas que aprovechan los ingenieros para diseñar soluciones con respecto a problemas del subsuelo. En muchos casos las tareas y las herramientas de los científicos e ingenieros son las mismas. La mejor manera de explicar esto es citando algunos ejemplos:

La rotura de algunas presas por causas geológicas y sus graves consecuencias, incluyendo pérdidas de cientos de vidas humanas, como la presa de San Francisco (California, 1928), la de Vajont (Italia, 1963) y la de Malpasset (Francia, 1959)

Los deslizamientos durante la construcción del Canal de Panamá en las primeras décadas del siglo, o las roturas de taludes en los ferrocarriles suecos en 1912, fueron algunos de los hitos que marcaron la necesidad de llevar a cabo estudios geológicos aplicados a la ingeniería.

A las 03:02 hora local un gran terremoto de magnitud 7,4 sacudió parte del noroeste de Turquía, al producirse la ruptura de una falla del Sistema Norte de la Falla de Anatolia, cuya longitud total es de unos 1,500 km. El segmento de falla desplazado fue de 150 km. El terremoto causó 17, 127 muertos, 43,953 heridos y más de 250,000 personas desplazadas. Las pérdidas han podido llegar al 3% del PIB de Turquía.

A pesar de que la edificación en la zona afectada era de hormigón armado, más de 20,000 edificios colapsaron por causa de la mala calidad de construcción e incumplimiento de las normas. Sin embargo, gran parte de los daños se debieron a fallos del terreno por efecto de las condiciones locales. En la zona de falla se registraron grandes aceleraciones, de hasta 0,42g, causando la destrucción total en un corredor de 5 a 22 m de ancho, correspondiendo a la ruptura superficial de la falla. El máximo desplazamiento lateral a lo largo de la misma fue de 5 m. A demás de las roturas en el terreno se registraron otros por colapsos, hundimientos y sobre todo por licuefacción de suelos (Anexo 28) Las zonas costeras de las ciudades afectadas, situadas sobre aluvial y rellenos artificiales, sufrieron las peores consecuencias.



Licuefacción del Suelo en Turquía

El deslizamiento de El Berrinche, Tegucigalpa (Honduras). Este deslizamiento se produjo como consecuencia del huracán Mitch el 30 de Octubre de 1998. El huracán, que asoló Centroamérica, ocasionó más de 25,000 muertos y una cifra incalculable de pérdidas. Las consecuencias fueron muy agravadas por la intensa deforestación y ocupación urbana de laderas inestables. Los deslizamientos ocurridos en algunas de las laderas populosas colonizadas por infraviviendas que rodean la ciudad de Tegucigalpa causaron daños muy elevados, quizás el mayor número de viviendas destruidas. La corriente de lodo arrastró gran cantidad de vegetación, vehículos y fragmentos de viviendas, alcanzó una altura de varios metros sobre las calles, dañando infraestructuras básicas de la ciudad. Las intensas lluvias asociadas al huracán Mitch en Tegucigalpa han sido una verdadera prueba para evaluación del comportamiento del terreno y su susceptibilidad ante los deslizamientos, denotándose un claro comportamiento

diferencial de unas zonas a otras en función del tipo de materiales geológicos presentes, quedando demostrado el control litológico de los procesos de inestabilidad de laderas. De hecho los mayores deslizamientos tuvieron lugar en materiales lutíticos y limolíticos con intercalaciones de grauvacas y areniscas arcillosas del Grupo Valle de Ángeles, materiales muy evolutivos frente a la meteorización, mientras que en el otro grupo litológico que aflora en la zona, constituido por tobas volcánicas masivas (Grupo volcanoclástico Padre Miguel), se produjeron algunos desprendimientos rocosos aislados.

La rotura de la presa Aznalcóllar: un ejemplo de fallo geológico-geotécnico de graves consecuencias ecológicas. La presa de residuos mineros de Aznalcóllar (Sevilla) de 28 metros de altura produjo su rotura el 25 de abril de 1998. La rotura del dique de contención produjo un vertido de 4,5 Hm<sup>3</sup> de líquidos y lodos hacia el río Agrio, y de ahí al Guadamar, afluente del Guadalquivir, ocasionando una contaminación por aguas ácidas con diversos metales pesados al ecosistema circundante, incluso el parque Nacional Doñana. La presa estaba apoyada sobre formación miocena constituida por arcillas de plasticidad alta, muy sobreconsolidadas, y con abundantes superficie de corte o slickensides en su interior que al entrar en contacto con el agua se generan altas presiones intersticiales a lo largo de dichas superficies, su resistencia puede ser muy baja. Es evidente que los factores geológicos –geotécnicos que ocasionaron la rotura no se tuvieron en cuenta adecuadamente y que tampoco los sistema de control del sistema presa-terreno fueron operativos, cuestiones fundamentales en Ingeniería Geológica, y Geología.

La Presa de Malpasset (Francia) en 1959, las presiones intersticiales resultantes del llenado del embalse crearon condiciones necesarias para la rotura de un gran bloque definido por discontinuidades (fracturas en el terreno). El fallo de la cimentación de la presa, una bóveda de 66.5 m, produjo el colapso de la misma y el vaciado inmediato del embalse, perdiendo la vida 421 habitantes del pueblo de Frejus como consecuencia de la inundación.

La Presa Vajont (Italia) en 1963. La catástrofe causó la muerte de 218 personas como consecuencia de un gran deslizamiento de unos 300 millones de metros



cúbicos sobre el embalse, lo que produjo una ola gigantesca (alrededor de 70 m de altura) que sobrepasó la presa sin destruirla (una bóveda de 265m de altura), y provocó la inundación y destrucción de gran parte de la localidad de Longarone, y otros núcleos urbanos del valle del Río Piave.

La presa de Teton (EE.UU) en 1975, de 93m de altura, estaba construida con materiales sueltos apoyados sobre tobas riolíticas muy fracturadas y permeables. La presa tenía un núcleo central formado por limos arcillosos poco plásticos y muy erosionables. Algunos meses después del llenado del embalse se observaron surgencias en el talud de aguas debajo de la presa junto al estribo derecho, que fueron aumentando y, en pocas horas, la percolación a través del cuerpo de presa provocó un gran hueco en la estructura y su rápido colapso. Afortunadamente fue posible salvar muchas vidas a pesar del corto tiempo transcurrido entre las primeras surgencias de agua y la rotura total, habiendo sólo 14 muertos. La causa de la rotura fue la erosión interna, al no controlarse suficientemente el flujo de agua a través de la cimentación de la presa con un tratamiento adecuado. El tipo de material del núcleo y otros aspectos del proyecto también influyeron en el accidente. En la actualidad, el gran desarrollo de la ingeniería geológica y de la mecánica de rocas posibilita que los estudios geológicos para el proyecto de presas detecten los posibles problemas de cimentación, de materiales o de estabilidad de laderas, analizando su influencia en la estabilidad y seguridad de las presas y permitiendo la adopción de las medidas necesarias de corrección.

En cada uno de estos casos el ingeniero y el científico geólogo tuvieron algo que aportar. Cada uno tuvo que familiarizarse con los requisitos del otro para llegar a una solución aceptable.

Por tanto, el fin en la actualidad de lo que la ingeniería geológica es asegurar que los factores condicionantes de las obras de ingeniería sean tenidos en cuenta e interpretados adecuadamente, así como evitar o mitigar las consecuencias de los riesgos geológicos tales como la licuefacción del suelo.

Sin embargo, el desarrollo que alcanzaron otras ciencias afines se hicieron cada vez más notorias como es el caso de la geotecnia, ciencia en que se integra las técnicas de ingeniería del terreno aplicadas a las cimentaciones, refuerzo, sostenimiento, mejora y excavación del terreno.

Efectivamente la formación de los ingenieros geólogos se manifiesta en dos grandes campos de actuación. El primero corresponde a los proyectos y obras de ingeniería donde el terreno constituye el soporte, o de construcción. Dentro de este ámbito se incluyen las obras verticales, estructuras principalmente dañadas al momento de la ocurrencia de la licuefacción del suelo. El segundo campo de actuación se refiere a la prevención, mitigación y control de riesgos geológicos como la licuación de los suelos, así como sus impactos en las obras civiles.

Pues bien, la ingeniería geológica, como ciencia aplicada a la ingeniería y al medio ambiente, tiene gran trascendencia socioeconómica, abarcando desde los estudios geotécnicos para la cimentación de edificios hasta las grandes obras públicas y de infraestructuras, y aportando soluciones constructivas acordes con la naturaleza geológica del terreno y el medio ambiente.

El conocimiento geológico es fundamental para el proyecto de las obras de de infraestructura, edificación, y para la ordenanza territorial o urbana. La interpretación de las condiciones geológicas, y su integración en el diseño y construcción, mediante soluciones acordes con la naturaleza del terreno y al medio ambiente, es el principal objetivo de la ingeniera geológica, junto a la prevención y mitigación de los daños causados por desastres naturales de origen geológicos.

## La Ingeniería Geológica: formación y profesión.....

La formación en Ingeniería geológica se basa en un sólido conocimiento de la geología y del comportamiento mecánico de los suelos y rocas y su respuesta ante los cambios de las condiciones impuestos por las obras de ingeniería. La investigación del terreno mediante métodos y técnicas de reconocimientos y ensayos, así como el análisis y modelización, tanto de los materiales como de los procesos geológicos (por ejemplo, licuefacción del suelo), forman parte esencial de esta disciplina.

El profesional en esta rama tiene formación científica y técnica aplicada a la solución de los problemas geológicos y ambientales que afecta la ingeniería, dando respuestas a las siguientes cuestiones:

Dónde situar una obra pública o instalación industrial para que su emplazamiento sea geológicamente seguro y constructivamente económico

En qué condiciones geológico-geotécnicas debe cimentarse un edificio

A qué tratamientos debe someterse el terreno para evitar o corregir hundimientos, asentamiento, la licuación, etc.

Cómo evitar, controlar o prevenir los riesgos geológicos (licuefacción del suelo)

Qué criterios geológicos-geotécnicos deben tenerse en cuenta en la ordenación territorial y urbana y en la mitigación de los impactos generados.

## Geología aplicada e Ingeniería geológica.....

La geología aplicada, o geología para ingenieros, geology for engineers, es la geología utilizada en la práctica por los ingenieros civiles. Es una rama de la geología que trata de su aplicación a las necesidades de la ingeniería civil. No implica necesariamente el uso de los métodos de ingeniería geológica para el estudio y resolución de los problemas geológicos en ingeniería.

La ingeniería geológica, engineering geology y geological engineering, se diferencia de la geología aplicada en que además del fundamento geológico, es necesario conocer los problemas del terreno que presentan obras de ingeniería, los métodos de investigaciones in situ y la clasificación y el comportamiento de los suelos (por ejemplos suelos licuables) y rocas en relación con la ingeniería civil; incluye además el conocimiento práctico de la mecánica del suelo, mecánica de rocas e hidrogeología.

**Anexo No. 3.** Entrevista al autor por colegas geólogos,  
Sismólogos y geofísicos



**a) ¿Cómo inicia la idea de este libro?**

Siempre me ha gustado los temas de actualidad, especialmente la geología, los terremotos, la gestión de riesgos a desastres naturales, la ingeniería sísmica y sismo resistencia; a su vez, son línea de trabajo no muy bien investigada y profundizada por los especialistas en la materia. A parte de esto, mi actual profesión tiene estrecha relación con estos asuntos. Sumada la experiencia acumulada de trabajos anteriores en instituciones de gobierno como el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (Ineter); la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN, Managua) y la Secretaría Ejecutiva del Sistema Nacional de Prevención, Mitigación y Reducción de Desastres (SE-SINAPRED). Razones que me indujeron a escribir este libro.

**b) ¿De qué trata el libro? ¿Cuál es su contenido?**

El contenido del texto es amplio y variado, en el cual se desarrollan y explican detalladamente tópicos entorno a la geología, los terremotos, repuesta dinámica de suelos y espectros de respuestas sísmicas, al igual que su incidencia en la subestructura de la Ciudad de Managua. El libro fue escrito en lenguaje claro, al alcance de todo público y para su empleo en la universidad, instituciones estatales y profesionales en la materia.

**c) ¿Quién le publica?**

La Editorial Académica Española (*ea*e), quienes tienen representación en países europeos, y regiones de Latinoamérica como México, Colombia, Chile y muy pronto en Nicaragua.

**d) ¿Donde podemos adquirirlo?**

A través de la *ea*e, solicitándole vía ON LINE en internet. Posteriormente la Editorial hace entrega del material por mensajería postal a la dirección que indique el interesado.

Cada quien puede acceder a ver y solicitar su ejemplar y otros recursos disponible en su actual pagina web.

**e) Hasta el momento ¿Quiénes le puede consultar?**

Todos (as), quienes deseen verlo, leerlo y analizarlo.

**f) ¿Por qué debo comprar tu libro?**

Porque permite actualizar sus conocimientos en geología, sismología, dinámica de suelos y sismo resistencia lo mejor posible, o bien, adentrarse exitosamente en estos temas; a su vez, constituye una herramienta de apoyo en los actuales currículos universitarios para materia como Diseño sismorresistente, geotecnia, geología, ingeniería civil u otros afines.

**g) ¿Está Usted comprometido, es casado o soltero?**

En la actualidad estoy comprometido con una muchacha, con quien tenemos dos niños. A ella le conocí y convivimos desde ya hace 05 años. Y Gracias a Dios, vamos bien.

**h) ¿Usted donde ha trabajado?**

Como les mencione antes, he trabajado para instituciones gubernamentales y educativas como Ineter; UNAN-Managua; y SINAPRED en la Ciudad de Managua (Nicaragua).

**i) Usted realizo sus estudios en España?**

Estuve en España realizando postgrados y especializaciones en Geología, Sismología y Gestión Ambiental en la Universidad Internacional de Andalucía (UNÍA) en la Ciudad de Huelva de ese país.

**j) ¿Cuánto duraron los estudios?**

Tengo buen tiempo que realice estos estudios; poco más o menos de 05 años sino mal recuerdo.

**k) ¿Cuáles son sus planes, qué espera hacer?**

Antes que nada, agradecerles a Ustedes por esta oportunidad de estar aquí conversando sobre estos temas. En lo referente a los planes, invitarlos a aquellos interesados en el libro que lo adquieran a través de la Editorial Académica Española (eae), a su vez, estamos a la disposición para servirles, y que podamos desarrollar trabajos conjuntos de consultoría, asesoría y capacitaciones en áreas de mi especialización como geología, minería, geotecnia, sismología, gestión ambiental, vulcanismos y gestión de riesgos a desastres naturales. Ustedes pueden contactarme a los teléfonos: (505) 22803022 / (505) 87999027. Correos electrónicos: *tobando\_geologic@yahoo.com*; *E.obandogeologic@gmail.com*

Estamos para ayudarles a todo público general, instituciones estatales, universidades, ONG, Sociedad Civil, Empresa Privada, Firmas Consultoras u otras afines.

Dios les bendiga

*¡MUCHAS GRACIAS!*

**TUPAK ERNESTO OBANDO RIVERA**

(Autor del libro)