

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO Y LA CARACTERIZACIÓN DE LOS TERRENOS DE CIMENTACION CON FINES DE DISEÑO SÍSMICO: ESTUDIO EN TRES CIUDADES MEXICANAS

Marlene Limaymanta Mendoza¹, Javier Lermo Samaniego¹ y Leonardo Alcántara Nolasco¹

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D.F., flimaymantam@iingen.unam.mx; jles@pumas.iingen.mx.unam.

INTRODUCCIÓN

El efecto de sitio está muy relacionado con la formación de los depósitos geológicos. Sin embargo, no depende de la clasificación geológica ya que se puede encontrar diferentes formas espectrales en una misma zona geológica. Por otro lado, la clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico nace con la necesidad de tomar en cuenta el efecto de sitio en el diseño de estructuras y ser parte de los reglamentos de construcción. Uno de los primeros en establecer una clasificación fue Seed en 1976, quien propuso tres clases de terrenos basado en la composición y espesor de los estratos: roca o suelo duro, suelo firme y suelo blando. Con el avance del conocimiento geológico, geofísico y geotécnico esta clasificación ha sido mejorada, es así que los reglamentos de construcción nacionales atienden los efectos de sitio clasificando el terreno en tres tipos, con base en el periodo dominante y la velocidad de onda de corte del suelo. Los códigos internacionales como, The International Building Code de USA (IBC), 2000 (Marshall, 2004) y el Eurocode 8, 2004 (Sousa C. et al., 2006) clasifican el terreno en seis clases y usan el parámetro V_{S30} , el cual se define como la velocidad de onda de corte en los primeros 30 m, para entrar a la tabla de clasificación.

En este trabajo, se propone un nuevo sistema de clasificación de terrenos que se basa en el estudio de la respuesta dinámica de la Zona Conurbada de Veracruz-Boca del Río (ZCV), la zona urbana de Acapulco, Gue., y la zona urbana de Oaxaca, Oax. Se escogió estas ciudades por presentar características geológicas distintas (la primera se ubica en la zona del Golfo de México, la segunda en las costas del pacífico y la tercera cerca al Eje Neovolcánico) y diferente actividad sísmica (aproximadamente, 35% de los sismos nacionales ocurren en zona de Guerrero, 15% en Oaxaca y 3% en Veracruz, según los reportes del Servicio Sismológico Nacional Mexicano).

Este nuevo sistema de clasificación depende de la frecuencia dominante del terreno, la velocidad de onda de corte y del espesor de los estratos. A continuación se describe, brevemente, el análisis de datos y la metodología usada para el planteamiento de nuestra propuesta.

ANÁLISIS DE DATOS Y METODOLOGÍA

INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOTÉCNICA Y GEOFÍSICA

Se obtuvo mapas de litología, morfología y de geología superficial, se recopiló información geotécnica (sondeos de penetración estándar) de cada ciudad y además se realizó refracciones sísmicas.

CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EMPÍRICA PROMEDIO (FTEP)

Para calcular la FTEP primero se calculó las funciones de transferencia empírica, FTE (con registros sísmicos y microtremores). Cuando se trabajó con registros sísmicos (más de tres registros sísmicos por estación) y no se contaba con una estación de referencia, la FTE se calculó con los coeficientes espectrales usando la técnica HVSR (razón espectral entre las componentes horizontales y la componente vertical, llamado también método de Nakamura para temblores), en caso contrario se usó la técnica SSR (razón espectral entre las componentes horizontales de la estación ubicada en un depósito y la estación de referencia, ubicada en roca o suelo firme). En los dos casos mencionados se trabajó con la fase intensa de las ondas S. En Acapulco se contó con 31 sismos registrados en la red fija de la ciudad, en Oaxaca con 18 sismos y en Veracruz con 12.

En el caso de los microtremores, se obtuvo tres muestreos de 60 s en cada punto de medición, de los registros obtenidos se seleccionaron de 3 a 6 ventanas con una duración de 10 s (las mismas para las

componente NS, EW y vertical) y se calculó los espectros de amplitud de Fourier para cada componente, con estos espectros se halló la FTE usando la técnica de Nakamura. Con este procedimiento se obtiene aproximadamente, en cada punto de medición, de 9 a 18 FTE para las componentes horizontales (NS y EW). Como ejemplo se presenta la Figura 1, la cual muestra las FTE para el punto 177 de la ciudad de Veracruz. En Acapulco se registró vibración ambiental en 13 puntos, en Oaxaca ,18 puntos y en Veracruz, 176 puntos.

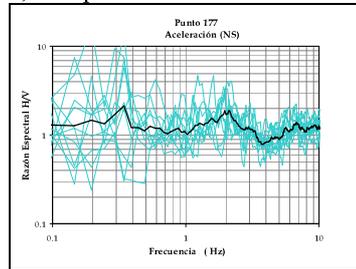


Figura 1. Líneas azules delgadas, FTE y la línea negra, FTEP.

Para obtener la FTEP se calculó la media geométrica de las FTE obtenidas con microtemores y con sismos, esta media fue escogida porque los valores extremos tienen menor influencia en el cálculo.

OBTENCIÓN DE FAMILIAS ESPECTRALES O NIVELES DE EFECTO DE SITIO SEGÚN LAS FORMAS ESPECTRALES DE LAS FTEP Y ZONACIÓN

Se agrupó las FTEP de acuerdo a las formas espectrales (implícitamente se observa el periodo predominante y la amplificación de las funciones). Con esta selección se encuentra varias familias espectrales y la ciudad en estudio queda dividida en zonas según su respuesta dinámica.

Esta respuesta se delimitó en un mapa y se obtuvo la zonación de la ciudad. Luego, sobreponiendo el mapa de zonación con los mapas geológicos y de zonificación geotécnica, se identificó las características geológicas y las geotécnicas del área encerrada por las fronteras de cada zona, con el propósito de obtener modelos estratigráficos representativos.

VALIDACIÓN DE LAS FAMILIAS ESPECTRALES

Para validar las zonas encontradas se determinó las funciones de transferencia teórica (FTT), ya que esta función depende de las propiedades del subsuelo. Se utilizó el método de Haskell (1962), modelo unidimensional, que permite calcular la FTT en un medio estratificado con características del subsuelo como: espesor, velocidad de propagación de ondas, densidad, amortiguamiento, el tipo de ondas incidentes (P o S), el ángulo de incidencia (γ) y el ángulo de polarización (θ) de las mismas. En el presente estudio, se consideró el caso de incidencia vertical ($\gamma=0$) de ondas S horizontalmente polarizadas ($\theta=0$, ondas SH). La FTT debe ser una curva envolvente de las FTEP para que la validación sea aceptable.

La Tabla 1 muestra el modelo estratigráfico encontrado para la zona VI de Acapulco y la Figura 2 muestra las FTEP así como la FTT para esta zona.

Tabla 1. Modelo estratigráfico representativo de la zona.

Nº	H	ρ	β	ξ
	(m)	(t/m ³)	(m/s)	(l)
1	5	1.6	110.0	0.04
2	7	1.7	230.0	0.04
3	3	1.6	200.0	0.04
4	8	1.7	250.0	0.04
5	20	1.6	130.0	0.04
Base	-	2	2100.0	0.01

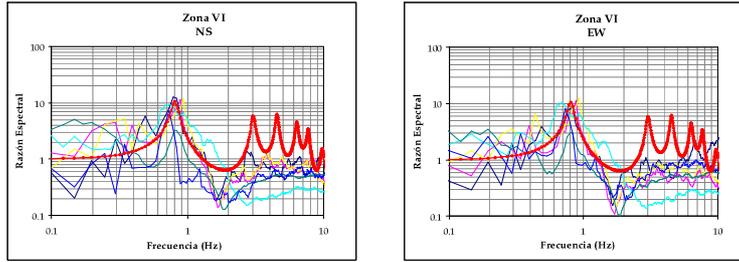


Figura 2. Líneas delgadas, FTEP; líneas gruesas rojas, FTT.

CLASIFICACIÓN DE TERRENOS

Se identificó la frecuencia predominante y la amplificación de los terrenos en cada zona. Paralelamente se calculó la velocidad de onda de corte hasta la profundidad a la cual llegó el modelo estratigráfico, esta velocidad se considera efectiva, pues se calcula asumiendo que los estratos son planos y homogéneos y que se encuentran sobre terreno firme, el cual pueden ser suelos muy rígidos, roca intemperizada o roca sana con $V_s > 700$ m/s. Para calcular esta velocidad se usa la expresión 1.

$$V_{sd} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (1)$$

Donde: d_i = espesor de cada uno que forma el modelo estratigráfico.

V_{si} = Velocidad de los estratos del modelo estratigráfico

Al observar los valores de frecuencia dominante, la velocidad efectiva y las características físicas de las zonas identificamos el comportamiento que se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Sistema de clasificación de terrenos propuesto con fines de diseño sísmico.

F (Hz)	V_{sd} (m/s)	Tipo de terreno	Descripción
>10	>700	A	Roca
≤ 10	500-700	B	Roca intemperizada, roca blanda
≤ 8.0	350-500	C	Suelos rígidos de profundidad superficial <10 m
≤ 5.0	250-350	D	Suelos rígidos de profundidad intermedia ≥ 10 m.
≤ 3.0	180-250	E	Suelos blandos o rígidos muy profundos ≥ 20 m.
≤ 1.5	<180	F	Suelos blandos, con espesores ≥ 30 m.

Con el criterio presentado en esta tabla se clasificó cada ciudad. Finalmente, cada clase de terreno encontrado se ubica espacialmente en un mapa georeferenciado y se obtiene como resultado final un mapa de clasificación de terreno por efecto de sitio.

RESULTADOS

Se presenta la clasificación de terrenos propuesta y usando las Normas Técnicas Complementarias (NTC) para Diseño Sísmico de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de 1993 para cada ciudad, así como los mapas de zonación y clasificación de terrenos.

ZONA CONURBADA DE VERACRUZ-BOCA DEL RÍO (ZCV)

Tabla 3. Sistema de clasificación propuesta para la ZCV

Zonas	F (Hz)	V _{sa} (m/s)	Tipo de Suelo	Descripción
I	>8.0	332	C	Suelos rígidos superficiales. Espesor de suelo <10 m y 500<V _s <350
II	3.5-4.5	201	D	Suelos rígidos de profundidad intermedia. Espesor de suelo >10, 250<V _s <350
III	2.5-3.0	221	E	Suelos blandos. Espesor de suelo >20 m, 180<V _s <250
IV	1.5-2.5	199	E	Suelos blandos. Espesor de suelo >20 m, 180<V _s <250

Tabla 4. Clasificación según las NTC para sismos de la CFE- 1993.

Zonas	B _C (m/s)	T _C (s)	B _S (m/s)	T _S (s)	B _C *T _C	B _C *T _S +B _S *T _C	Tipo de suelo
I	400	5.3	332	0.103	2120.000	1801.756	Tipo III
II	400	5.3	201	0.239	2120.000	1161.551	Tipo III
III	400	5.3	221	0.388	2120.000	1330.503	Tipo III
IV	400	5.3	199	0.441	2120.000	1234.125	Tipo III

Donde: B_C y T_C, son valores característicos dependientes de la zona sísmica, T_S y B_S son el periodo predominante y la velocidad efectiva de cada zona. Si B₀≥700 m/s (valor de V_S del terreno firme) se clasifica como tipo I, si β_CT_S + β_ST_C ≥ B_CT_C como tipo II y si β_CT_S + β_ST_C < B_CT_C como tipo III.

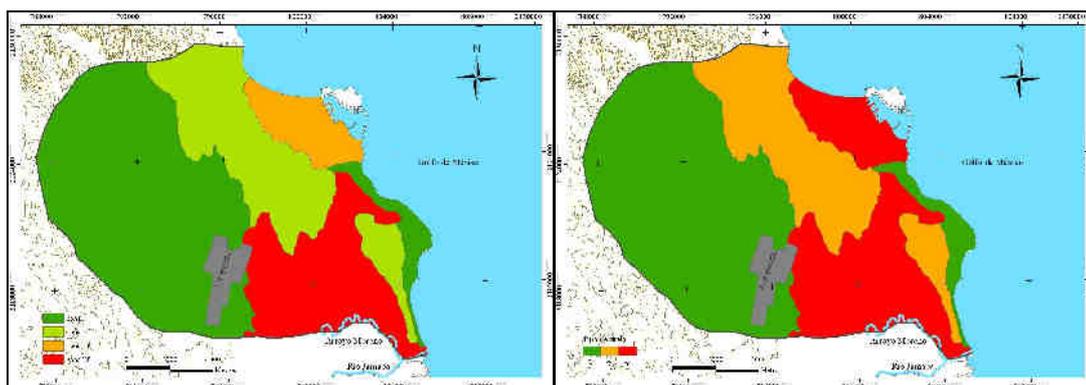


Figura 3. Lado Izquierdo, zonación por efecto de sitio; lado derecho, clasificación propuesta.

ZONA URBANA DE ACAPULCO, GUE.

Tabla 5. Sistema de clasificación propuesta para la ciudad de Acapulco.

Zona	F (Hz)	V _{sa} (m/s)	Tipo de Suelo	Comentarios
I	≥ 10	520	B	Roca blanda. Espesor de suelo < 6 m. V _S >700 m/s
II	3.0-4.0	292	D	Suelos rígidos de profundidad intermedia. Espesor de suelo ≥ 10 m, 250<V _s <350
III	2.0-3.0	263	E	Suelos rígidos muy profundos. Espesor de suelo > 20 m, 180<V _s <250
IV	1.5	299	E	Suelos rígidos muy profundos.
V	1.0	151	F	Suelos blandos, Espesor ≥ 30, V _S < 180
VI	0.7-0.9	155	F	Suelo blando

Tabla 6. Clasificación según las NTC para sismos de I a CFE- 1993.

Zonas	B_C (m/s)	T_C	B_S	T_S	$B_C * T_C$	$B_C * T_S + B_S * T_C$	Tipo de suelos
I	500	2.50	520	0.07	1250.00	1326.92	Tipo II
II	500	2.50	292	0.26	1250.00	859.31	Tipo III
III	500	2.50	263	0.58	1250.00	947.02	Tipo III
IV	500	2.50	299	0.73	1250.00	1115.94	Tipo III
V	500	2.50	151	0.98	1250.00	867.01	Tipo III
VI	500	2.50	155	1.11	1250.00	941.93	Tipo III

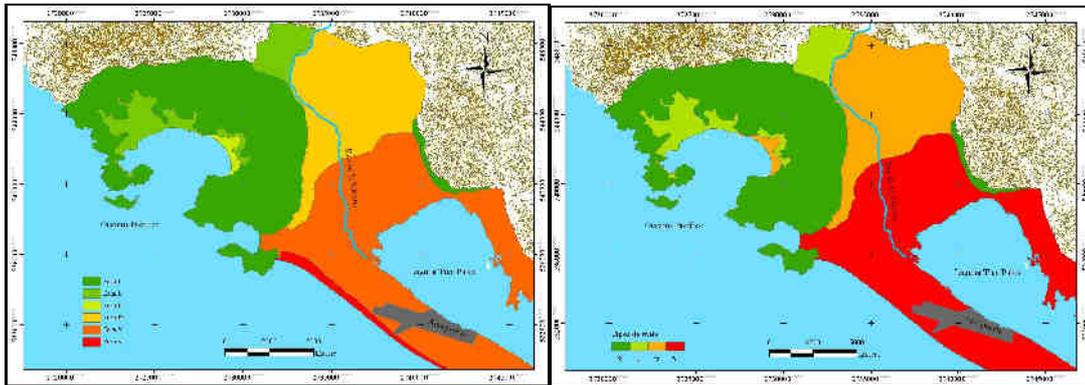


Figura 4. Lado Izquierdo, zonación por efecto de sitio; lado derecho, clasificación propuesta.

ZONA URBANA DE OAXACA, OAX.

Tabla 7. Sistema de clasificación propuesta para la ciudad de Oaxaca

Zonas	F (Hz)	V_{sa} (m/s)	Tipo de Suelo	Comentarios
I	10		B	Roca blanda. Espesor de suelo < 6m. $V_S > 700$ m/s
II	6.0-7.0	301	C	Suelos rígidos superficiales. Espesor de suelo < 10 m y $500 < V_S < 350$
III	4.0-5.0	300	D	Suelos rígidos de profundidad intermedia. Espesor de suelo ≥ 10 m, $250 < V_S < 350$
IV	2.5-3.0	210	E	Suelos rígidos muy profundos. Espesor de suelo > 20 m, $180 < V_S < 250$
V	2.0-2.5	262	E	Suelos rígidos muy profundos
VI	1.5-2.0	186	F	Suelos blandos, Espesor ≥ 30 , $V_S < 180$

Tabla 8. Clasificación según las NTC para sismos de la CFE-1993.

Zonas	B_C	T_C	B_S	T_S	$B_C * T_C$	$B_C * T_S + B_S * T_C$	Tipo de suelos
II	500.00	4.70	301.16	0.12	2350.00	1501.78	Tipo III
III	500.00	4.70	300.12	0.24	2350.00	1530.52	Tipo III
IV	500.00	4.70	210.00	0.29	2350.00	1129.86	Tipo III
V	500.00	4.70	262.04	0.49	2350.00	1475.82	Tipo III
VI	500.00	4.70	186.35	0.65	2350.00	1203.19	Tipo III

En la zona I no se calculo el V_s porque no se contó con suficientes datos, pero se propone un V_{S30} mayor a 760 m/s por tratarse de una zona que esta conformada por rocas metamórficas (en esta zona no existe construcción de viviendas, pero se encuentra la zona arqueológica de Monte Alban).

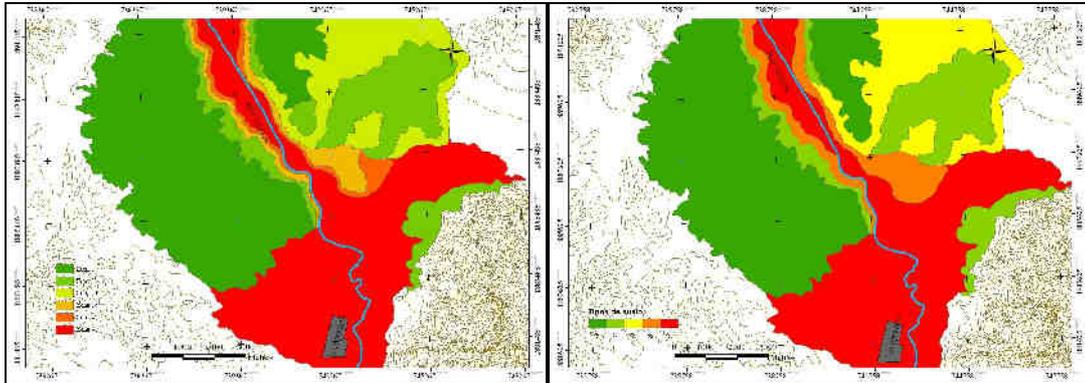


Figura 5. Lado Izquierdo, zonación por efecto de sitio; lado derecho, clasificación propuesta.

En los tres casos la clasificación propuesta es más detallada que la encontrada con las Normas de CFE. En Veracruz se encontró tres tipos de terreno (C, D y E) a comparación de un solo tipo según la CFE (Tipo III). En Acapulco se encontró cuatro tipos (B, D, E y F) a comparación de dos tipos (Tipo II y III) con la CFE y en la ciudad de Oaxaca se encontró cinco tipos de terreno (B, C, D, E y F) a diferencia de un tipo de terreno (tipo III) según la CFE.

REFERENCIAS

- Comisión Federal de Electricidad, 1993, Diseño por Sismo, Manual de Diseño de Obras Civiles, p.1.3.1-1.3.29.
- Carlos Sousa Oliveira, Antoni Roca, Xavier Goula, 2006, Assessing and Managing Earthquake Risk: Geotechnical and Engineering Knowledge for Earthquake Risk Mitigation--Developments, Tools, Techniques (Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering, p.47-83.
- Esquivel R., 1976, Veracruz, Ver., Información General acerca del subsuelo de 17 Ciudades de México, Memorias de la VIII reunión Nacional de Mecánica de suelos, Tomo II, p. 245-256.
- Haskell N. A., 1962, Radiation patterns of surface waves from point source in multi-layered medium, Bulletin of Sismological Society of America, N°54, p. 377-393.
- León J. L., 1976, Acapulco, Gro., Información General acerca del subsuelo de 17 Ciudades de México, Memorias de la VIII reunión Nacional de Mecánica de suelos, Tomo II, p. 1-26.
- León J. L., 1976, Oaxaca, OAX., Información General acerca del subsuelo de 17 Ciudades de México, Memorias de la VIII reunión Nacional de Mecánica de suelos, Tomo II, p. 157-181.
- Lermo J. and Chávez-García FJ., 1993, Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, Bull. Seism. Soc. Am., 83, p. 1574 – 1594.
- Lermo J. and Chávez-García FJ., 1994a, Are microtremors useful in site response evaluation ?, Bull. Seism. Soc. Am. 84, p. 1350-1364.
- Lermo J. and Chávez-García FJ., 1994b, Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records”, Soil. Dyn. & Earthq. Eng. 13, p. 413-423.
- Lermo J., Torres G., Almanza P., Vargas A., Cruz J. y Hernández J.A., 1995, Efectos de sitio en el Puerto de Veracruz, México, Microzonificación Sísmica Preliminar, Memorias del XX congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, A.C., p. 115-120, Veracruz, Ver., México.
- Lopez Ramos E., 1981, Geología de México, Tomo III, p. 43-108.
- Marshall L., 2003, Geotechnical Design Consideration, The Seismic Design Handbook, p. 125-145.
- Morán Zenteno D. J., 1984, Geología de la República Mexicana, Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática, p. 88.
- Ovando S. E., Jurado R. M., Sanchez M. E., Camacho M. L. 1989, Recopilación y análisis de datos geotécnicos de Acapulco, Gobierno del estado de Guerrero, p. 40.
- Páez I., 2000, Características Geotécnicas y Criterios Básicos para el Diseño de Cimentaciones en la Zona Conurbada de Veracruz, Ver., Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, p. 100.
- Seed Bolton H., 1986, Influencia de las condiciones locales de suelo en movimientos del terreno y en daños a edificios durante sismos, Octava conferencia Nabor Carrillo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, p. 187.