

Detección de la licuefacción mediante acelerogramas de respuesta del suelo en el área de la Ciudad de Managua (Nicaragua)

POR:

Dr. Tupak Ernesto Obando Rivera
Ingeniero en Geología. Master y Doctorado
en Geología, y Gestión Ambiental por la
Universidad Internacional de Andalucía
UNÍA (Huelva, España). Especialista en
Deslizamientos Volcánico y No Volcánicos

2009

Introducción

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.

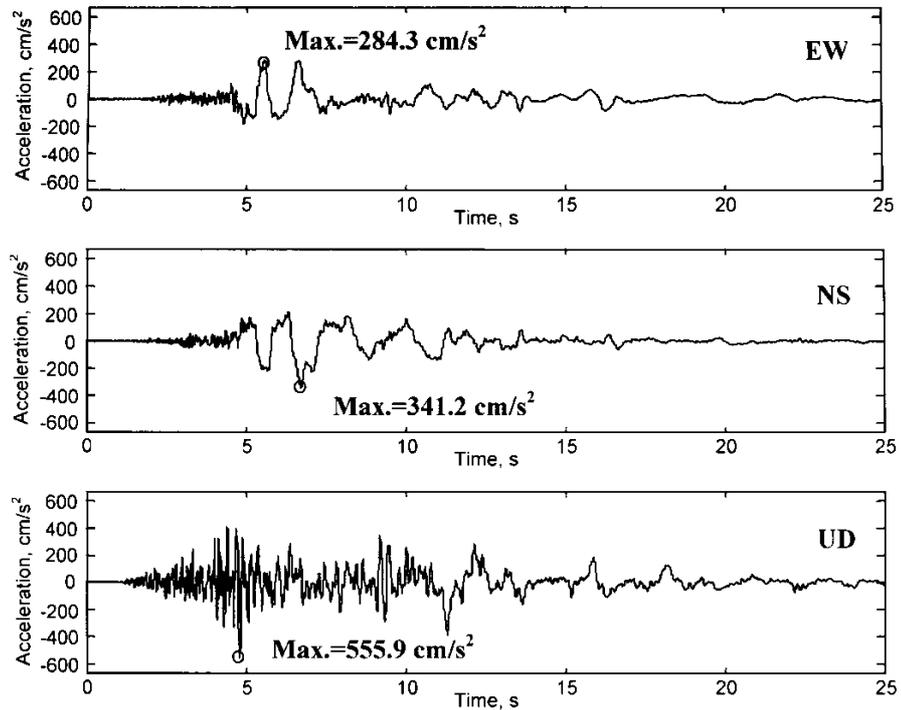
En la actualidad, muchos países altamente sísmicos recurren a registros gráficos para investigar el fenómeno de la licuefacción del suelo, entre ellos Japón, y los Estados Unidos Americanos (USA).

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 (MaríaSusana.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.



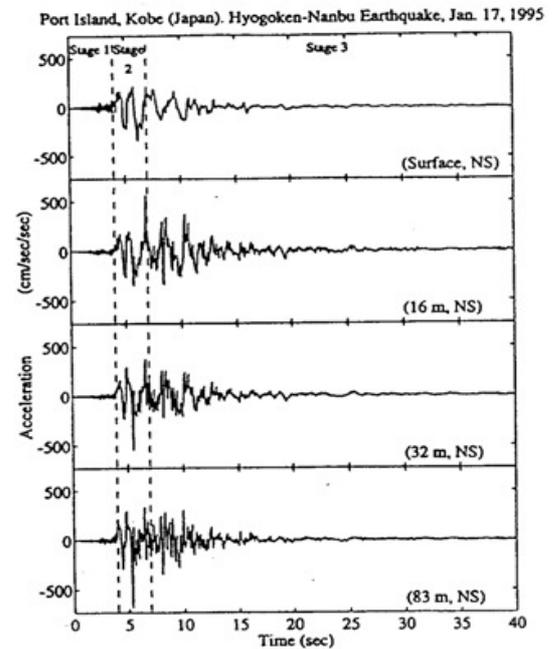
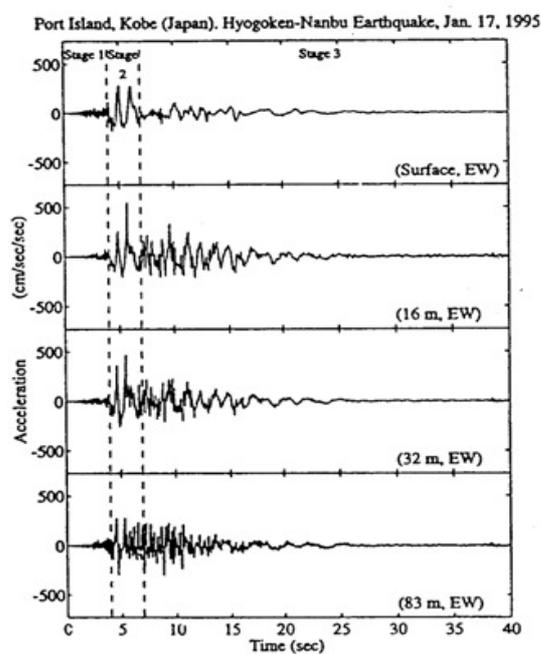
Espectro de respuesta de aceleraciones representativo del emplazamiento en Port Island, luego del terremoto de Hyogoken-Nanbude en Japón (1995)

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. Fuente:

García Nuñez (2,007)

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.

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

Fuente: PARRALES et. al (2,001)

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 No xx.

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)

Fuente: Parrales et. al (2,001)

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/shakman1.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.

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

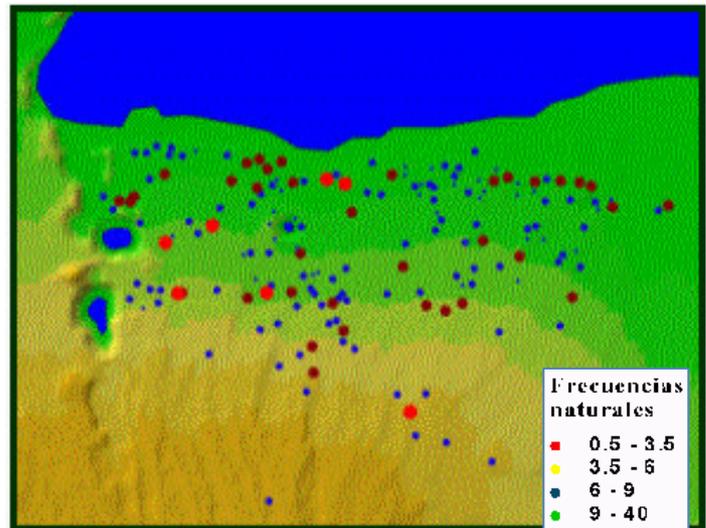


Figura No xxx. Frecuencias naturales del suelo, sobre todo, al Oeste de Managua
Fuente: INETER (2000)

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 módulo 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

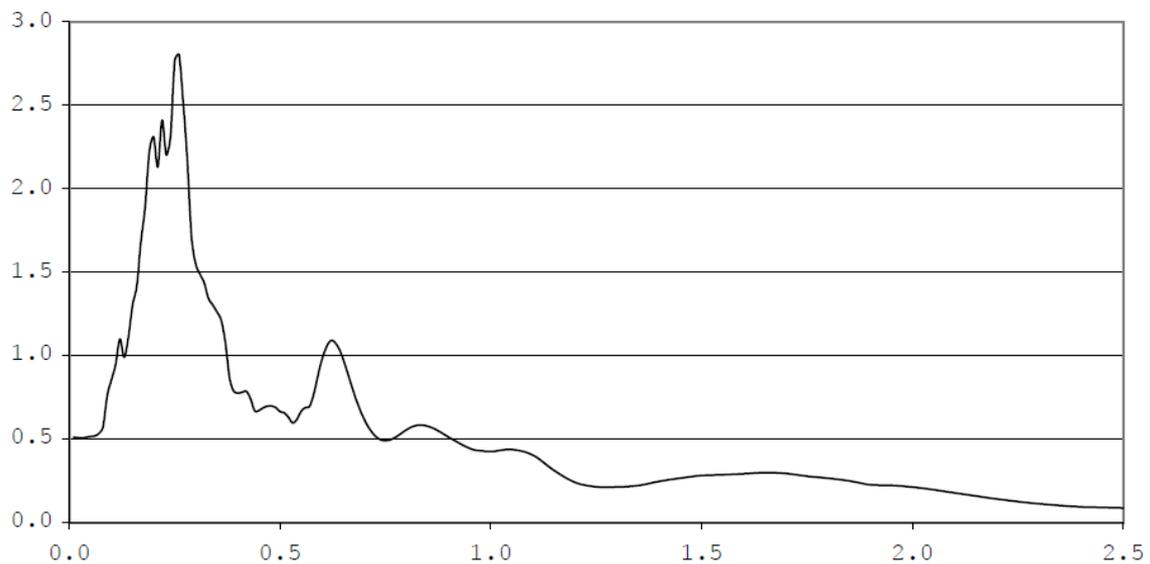
- Ubicación geográfica: **LINDA VISTA**
- Parámetros sísmicos:

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

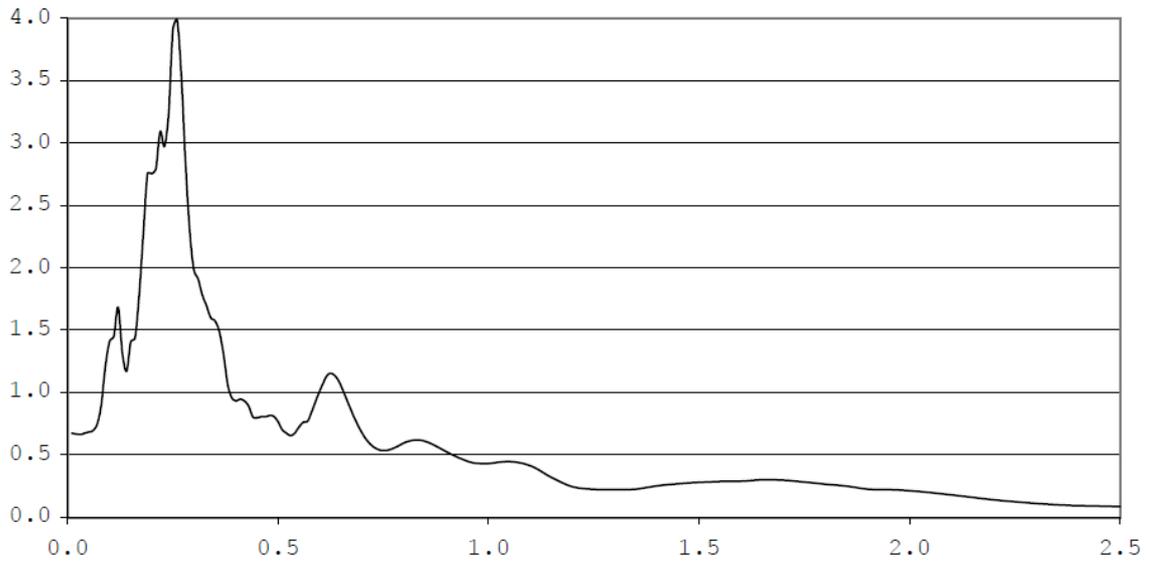
- Ubicación geográfica: **JULIO MARTINEZ**
- Coordenadas UTM: N1343400 – E577700
- Parámetros sísmicos:

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

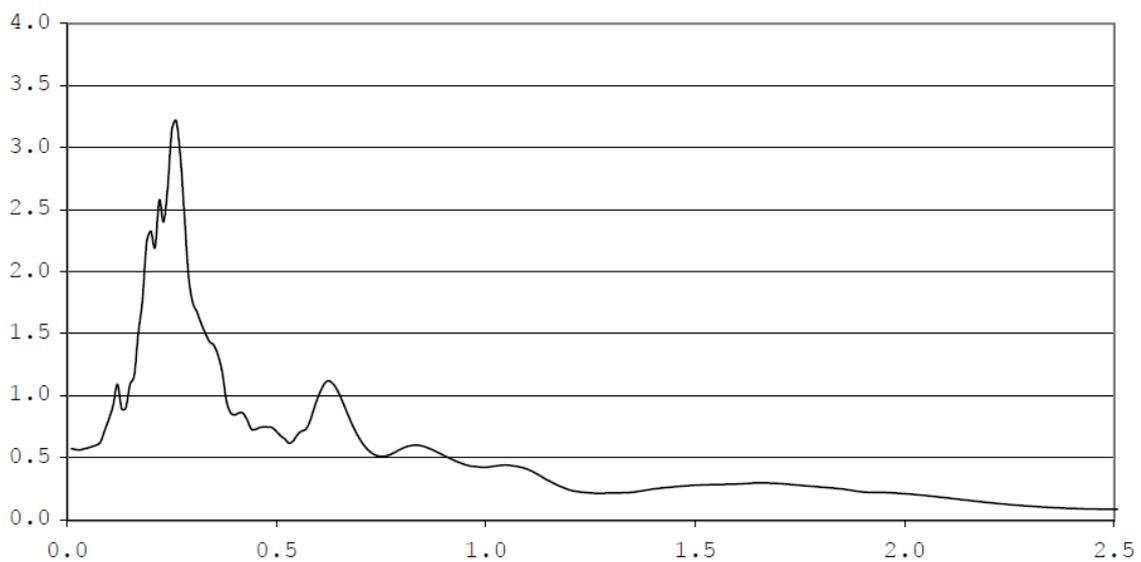
- Ubicación geográfica: **PROYECTO AGUAS SERVIDAS**
- Parámetros sísmicos:

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

Contenido de frecuencia: 3.85 c/seg

Periodos naturales dominantes: 0.26seg

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



Espectro de Respuesta IV

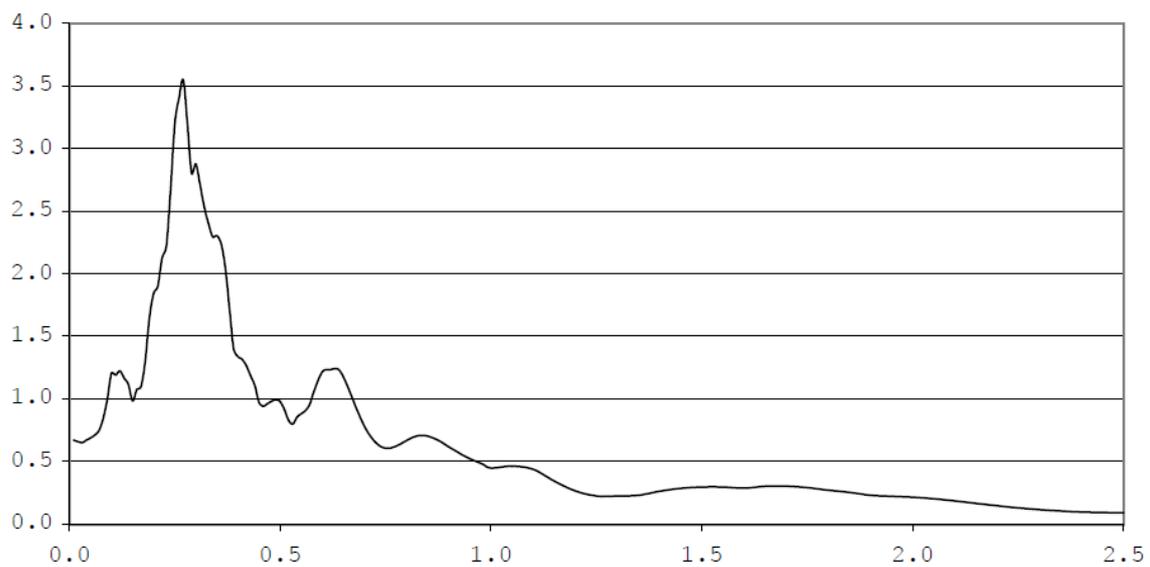
- Ubicación geográfica: **TEATRO RUBÉN DARÍO**
- Coordenadas UTM: N1344000 – E579200
- Parámetros sísmicos:

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

Contenido de frecuencia: $3.70\text{ c}/\text{seg}$

Periodos naturales dominantes: 0.27seg

Cociente Espectral: $0,96$ (terreno totalmente amplificado)



Espectro de Respuesta V

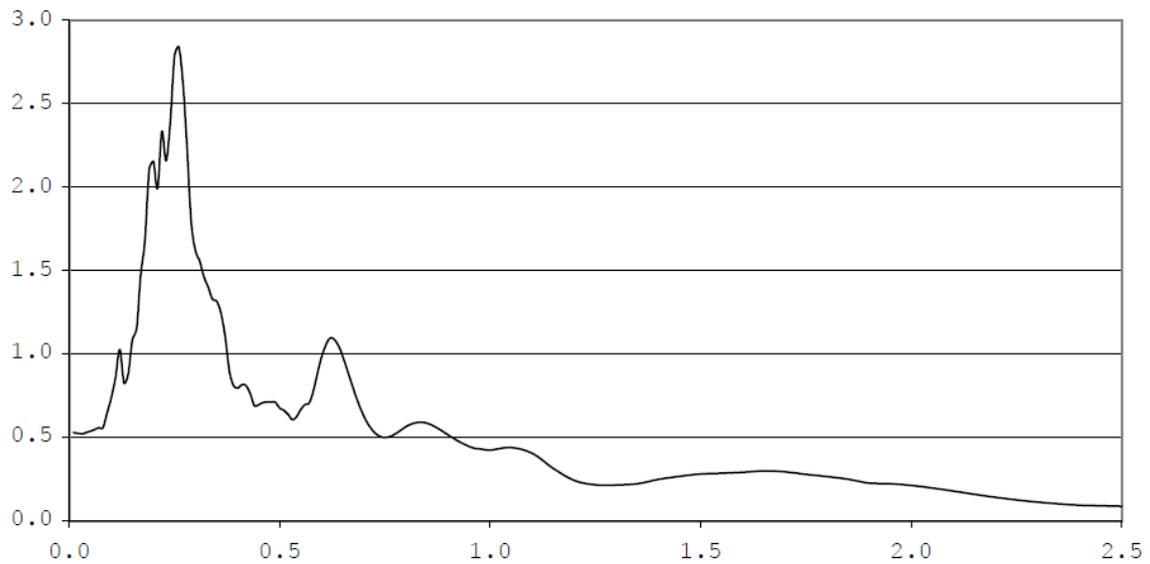
- Ubicación geográfica: **EDIFICIO SILVIO MAYORGA**
- Parámetros sísmicos:

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

Contenido de frecuencia: $3.85\text{ c}/\text{seg}$

Periodos naturales dominantes: 0.26seg

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



Espectro de Respuesta VI

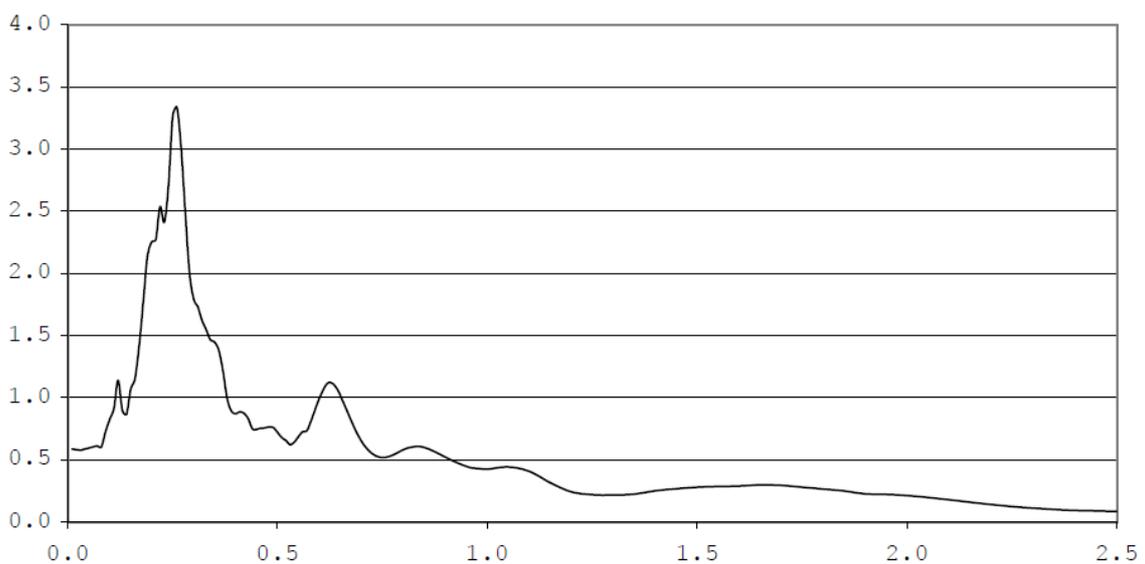
- Ubicación geográfica: **SAN ISIDRO**
- Coordenadas cartográficas: N1335000 – E581000
- Parámetros sísmicos:

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

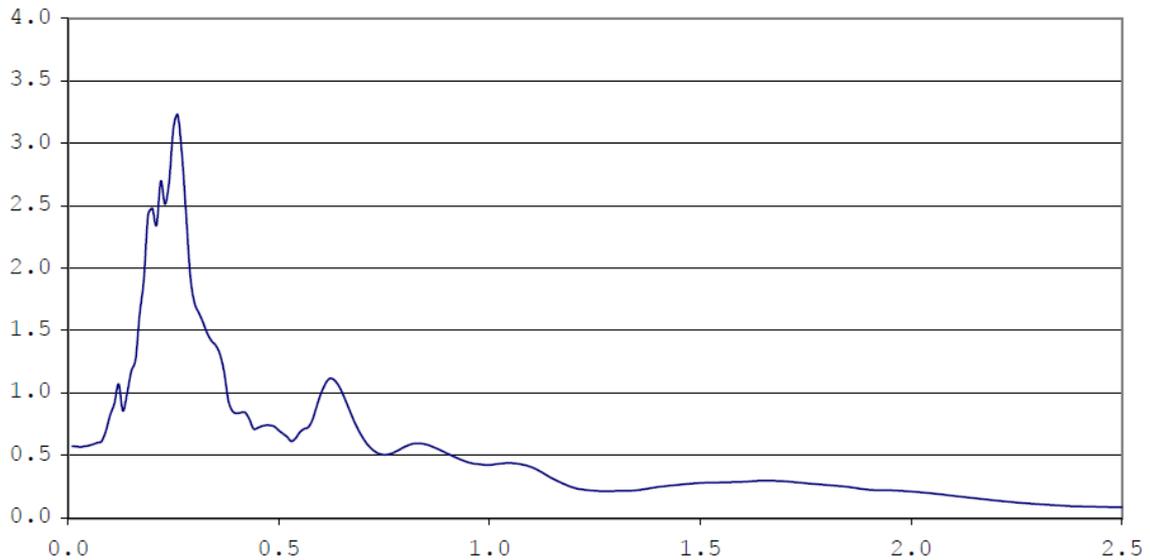
- Ubicación geográfica: **ALTOS DE SANTO DOMINGO**
- Parámetros sísmicos:

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

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

Periodos naturales dominantes: 0.26seg

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



Espectro de Respuesta VIII

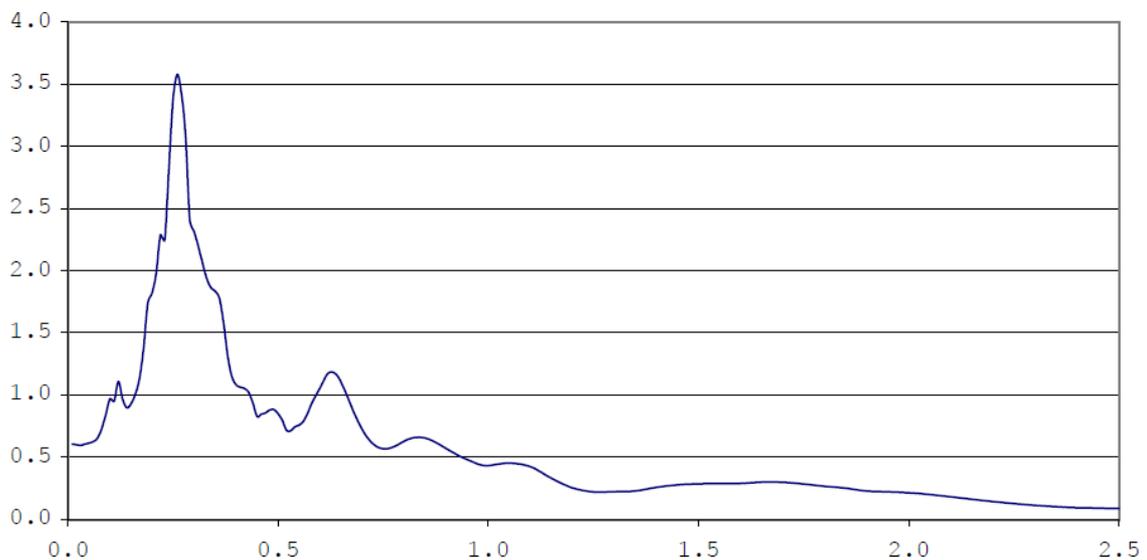
- Ubicación geográfica: **ALTAGRACIA**
- Parámetros sísmicos:

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

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

Periodos naturales dominantes: 0.26seg

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



Espectro de Respuesta IX

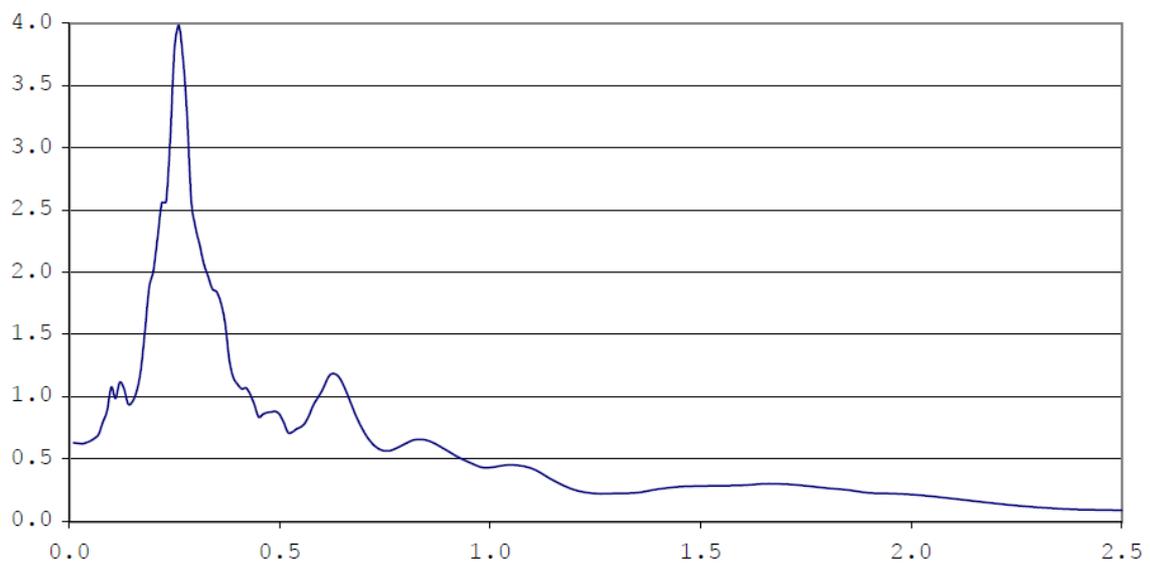
- Ubicación geográfica: **UNAN-RURD**
- Coordenadas UTM: N1338100 – E579500
- Parámetros sísmicos:

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

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

Periodos naturales dominantes: 0.26seg

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



SÍNTESIS

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.

- A partir de los datos obtenidos, se solicita a ingenieros constructores considerar esta información en la planificación y diseños de obras civiles sismorresistentes. 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 humana, y reducir pérdidas de bienes materiales.
- Por último, el Fenómeno de Resonancia, es definido por algunos especialistas 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.

Bibliografía

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.