

## **Características del Movimiento Sísmico en la Ciudad de Lima**

**Juan Bariola<sup>1</sup>, Alfonso Cordero<sup>2</sup>**

### **RESUMEN**

El objetivo fue estudiar las características del movimiento sísmico en la ciudad de Lima. Se realizó el análisis sísmico de depósitos de suelo en Lima, La Molina, Chorrillos, Callao y La Punta. Se realizó el análisis considerando las variables: aceleración pico en roca, profundidad del depósito, y un juego de 10 acelerogramas. Se obtuvo la respuesta en la superficie, espectros de respuesta y espectros de probabilidad uniforme. Los resultados indicaron que para todo tipo de suelo (firme o blando) la respuesta en la superficie libre depende de (1) la cercanía entre el período del movimiento en roca y el período natural del depósito, y de (2) la resistencia al corte del terreno. En caso de coincidir los períodos de roca y suelo, la amplificación de aceleraciones y la amplificación espectral pueden ser más altas que las indicadas por las normas.

### **INTRODUCCIÓN**

La amplificación local de los suelos ha incrementado el daño causado por los sismos en el Perú y en diferentes países. En los sismos de 1966, 1970 y 1974, pudieron observarse menores daños que el centro de Lima, San Isidro, Miraflores, etc. donde existen suelos firmes de gran profundidad, que en La Molina, Chorrillos y otros distritos donde existen depósitos de menor profundidad estratos superiores de suelos blandos.

Las características del movimiento sísmico en la mayoría de distritos de Lima son desconocidas, en particular para sismos fuertes. Existe un número limitado de registros de sismos fuertes en algunos distritos como Lima (Parque de la Reserva), Surco y Zarate. La profundidad a la roca tiene un máximo de aproximadamente 400 m en la zona oeste cerca del mar, reduciéndose hasta unos 100 m o menos en el este de la ciudad. El análisis sísmico de los depósitos de suelo se realizó con el programa EERA (Bardet [1]).

### **SITIOS ANALIZADOS**

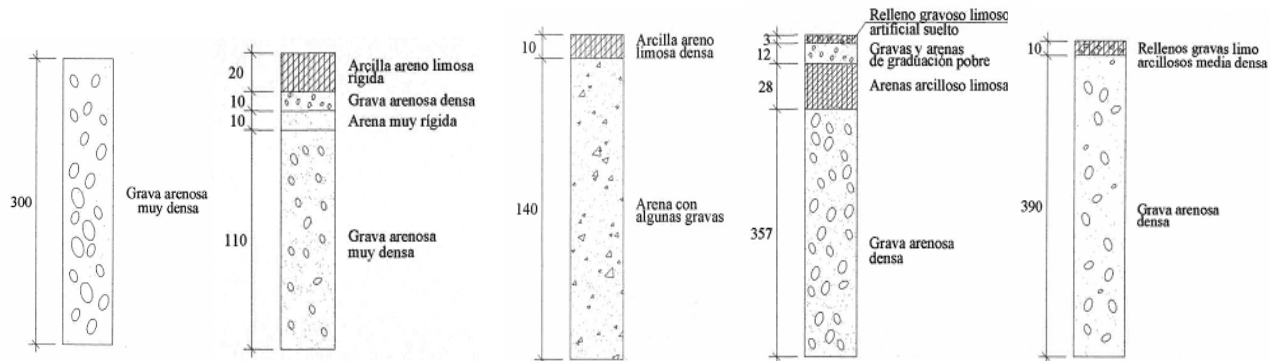
Se realizaron análisis en los distritos del Centro de Lima, La Molina, El Callao, La Punta y Chorrillos (Fig. 1). Como se puede observar (Fig. 1) se trata de depósitos de grava algunos con profundidad mayor de 300 m, y otros menores que 150 m con estratos superiores de arenas, limos o arcillas con un espesor entre 10 y 50 m. La grava es pobremente graduada pero

---

<sup>1</sup> Consultor

<sup>2</sup> Golder Associates Perú

bastante densa (Repetto [2]). Existen mediciones de velocidades de ondas de corte en grava en la estación del Instituto Geofísico del Perú del Parque de la Reserva (Repetto [2]). La información geotécnica fue recopilada por Cordero [3]. Las profundidades a la roca en la ciudad fueron tomadas de los planos de Arce [4]. Las mediciones de velocidades de ondas de corte fueron obtenidas de investigaciones de CISMID (Ayquipa[5], CISMID[6], Chávez[7], Huamán[8], Meneses[9], Polo[10]).



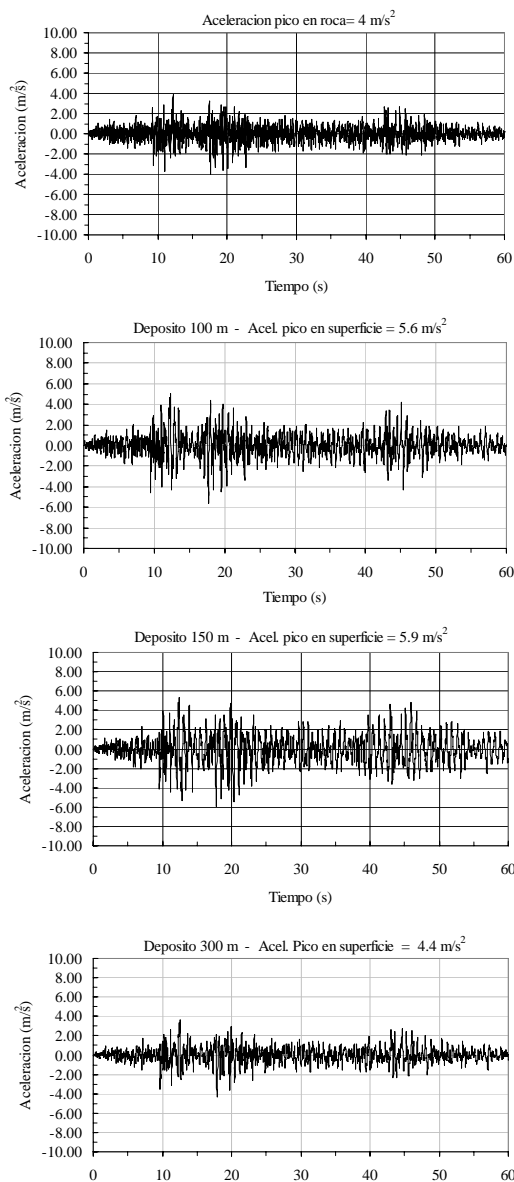
**Figura 1. (de izq. a derecha) Depósitos de Suelo: Parque de la Reserva, La Molina, Chorrillos, La Punta y El Callao**

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

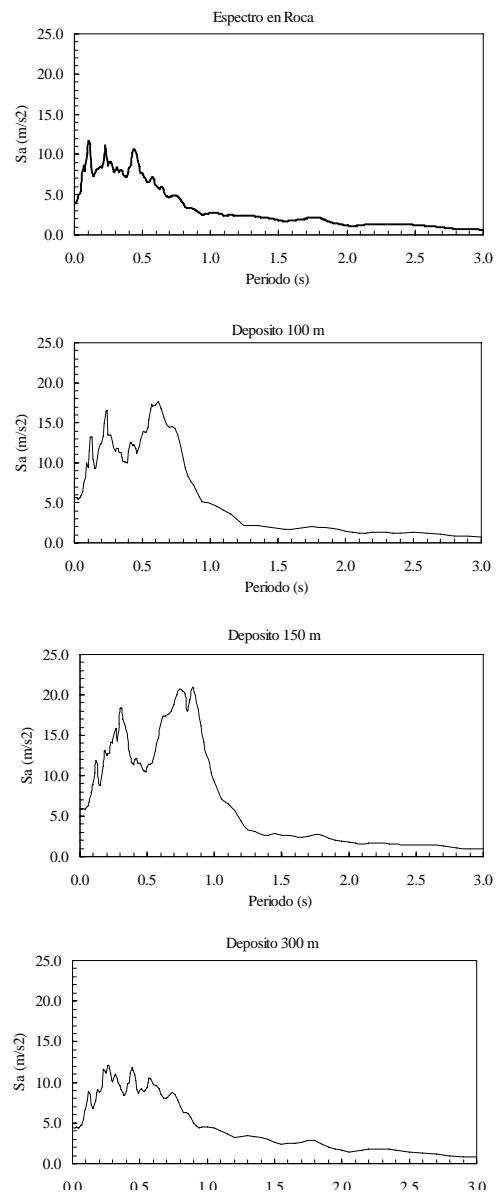
Para investigar la respuesta dinámica de la grava de Lima, se analizaron 3 modelos de 100, 150 y 300 m de profundidad. El análisis se realizó con el programa EERA (Bardet [1]). Se usó para el análisis el registro de aceleraciones en roca correspondiente al sismo de Lima del 3 de Octubre de 1974. Este registro fue obtenido del análisis del depósito bajo la estación del IGP descrita antes usando como data el registro observado en la superficie (Bariola [11]). La Figura 2 muestra los registros de aceleración en roca en la superficie de los 3 depósitos y la Fig. 3 los espectros correspondientes. La Tabla 1 indica los valores del período natural calculado para pequeñas deformaciones con el programa EERA y aceleración pico en la superficie de los depósitos. La aceleración pico fue: (1)  $4 \text{ m/s}^2$  en la roca y (2) 5.6, 5.9 y  $4.4 \text{ m/s}^2$  en la superficie libre de los depósitos de 100, 150 y 300 m, respectivamente (Tabla 2). Puede apreciarse (Fig. 2) que para el depósito de 100 m de profundidad, el pico de mayor amplitud corresponde a un período de 0.60 s en lugar de 0.40 s, periodo natural del depósito (Tabla 1). Esto ocurrió por la reducción de rigidez durante la respuesta no lineal como pudo observarse en el ciclo histerético tensión deformación. Algo similar ocurre para el depósito de 150 m, para el cual el período creció de 0.5 a aproximadamente 0.8 s.

**Tabla 1. Período de vibración de los depósitos**

Prof. del depósito (m)	Período natural (s)	Período del 2 <sup>do</sup> modo (s)
100	0.40	0.10
150	0.50	0.20
300	1.00	0.30



**Figura 2. Movimiento en roca y respuesta de los depósitos de suelo**



**Figura 3. Espectros de respuesta en roca y superficie (5% amort.)**

**Tabla 2. Respuesta de aceleraciones y amplificación – Depósitos en grava**

Depósito/roca	Acel. pico en la base del depósito $m/s^2$	Acel. pico en la superficie libre del depósito $m/s^2$	Amplificación de aceleraciones (*)	Amplificación espectral pico
Roca	4	4	--	2.8
Depósito 100 m	4	5.6	1.4	3.2
Depósito 150 m	4	5.9	1.475	3.6
Depósito 300 m	4	4.4	1.1	2.8

(\*) Aceleración pico en la superficie dividida por la aceleración en roca ( $4 m/s^2$ )

La Tabla 2 indica los valores de la aceleración pico en roca, la aceleración pico en la superficie libre del depósito, la amplificación de aceleraciones (ratio entre ambas) y la amplificación espectral pico. Por simplicidad el termino amplificación de aceleraciones se referirá al ratio entre aceleración pico en la superficie libre y aceleración pico en roca. Mientras que la amplificación espectral se refiere al ratio entre la aceleración pico de respuesta pico y la aceleración pico en la superficie libre.

Puede apreciarse que para depósitos menores de 150 m, la amplificación de aceleraciones está en el orden de 1.5. La amplificación espectral pico es de 3.6 para períodos entre aproximadamente 0.6 y 1.0 s, lo cual corresponde a edificaciones de media altura. Para depósitos de grava de 300 m de profundidad no existe prácticamente amplificación, lo cual es corroborado por el poco daño observado en distritos con depósitos profundos de grava como el centro de Lima, Miraflores y San Isidro.

En la Tabla 3 se ha estimado la respuesta en la superficie libre de un depósito de suelo usando un

**Tabla 3. Estimación de la respuesta del depósito**

Profundidad del depósito (m)	Período para amplitud pico en el espectro de Fourier (s)	Aceleración estimada en la superficie (m/s <sup>2</sup> )
100	0.60	6.0
150	0.75	5.0
300	1.50	3.0

modelo de un grado de libertad. Para este fin se consideró un período característico igual a 1.5 veces el período natural para tomar en consideración la reducción de rigidez asociada a la respuesta no lineal. La Tabla 3 indica las aceleraciones estimadas en la superficie libre de los depósitos leyendo del espectro en roca (Fig. 3) la aceleración de respuesta para el valor del período característico (Tabla 2). Estos valores de aceleración (Tabla 2) pueden considerarse razonables para propósitos prácticos.

Puede apreciarse en la Figura 2 que los espectros de respuesta contienen períodos de la excitación (0.1 a 0.5 s) así como del depósito (0.6 a 0.8 s), rango en el cual los depósitos de 100 y 150 m presentan sus mayores amplitudes. Es interesante observar que el depósito de 100 m de profundidad alcanza menores aceleraciones que el depósito de 150 m, aun cuando su período natural esta más cerca de los períodos del movimiento en roca. De la observación de los ciclos histeréticos se pudo determinar que el depósito de 100 m alcanza un deterioro de rigidez y resistencia bastante mayor que el depósito de 150 m. Por este motivo es aparente que al haber agotado su capacidad el depósito de 100 m no puede desarrollar mayores aceleraciones.

A continuación se analizaron los depósitos del Parque de la Reserva, La Molina, El Callao, La Punta y Chorrillos obteniéndose la respuesta y espectros en la superficie. Para este fin se usó un juego de registros en roca obtenidos del análisis de los registros en suelo (Tabla 4). En la Tabla 5 se indican los valores de amplificación de aceleraciones y amplificaciones espectrales para los 5 depósitos. En la Fig. 4 se muestra el espectro de respuesta de aceleraciones en La Molina y en la Figura 5, los espectros para los 5 depósitos. En ambos casos el registro en roca corresponde a la estación IGP, Lima 3 de Octubre de 1974, roca, normalizado a 4 m/s<sup>2</sup>.

Para el caso de La Molina (Tabla 5), la aceleración pico subió de 4.0 m/s<sup>2</sup> en la roca a 7.7 m/s<sup>2</sup> en la superficie libre. El espectro tiene una amplificación bastante alta (3.8), sin embargo, similar a la de un depósito de grava de igual profundidad (3.6), (Tabla 2). Es decir parece ser que la alta amplificación espectral en La Molina, esta asociada en buena parte a la resonancia entre el movimiento en roca y el depósito y no solamente al estrato de suelo “blando” superior. Sin embargo para profundidades iguales la amplificación de aceleraciones es mayor en caso de La Molina (1.9, Tabla 5) que en el caso de grava de (1.475, Tabla 2). El modo fundamental del depósito es aproximadamente 0.6 s, el cual fue

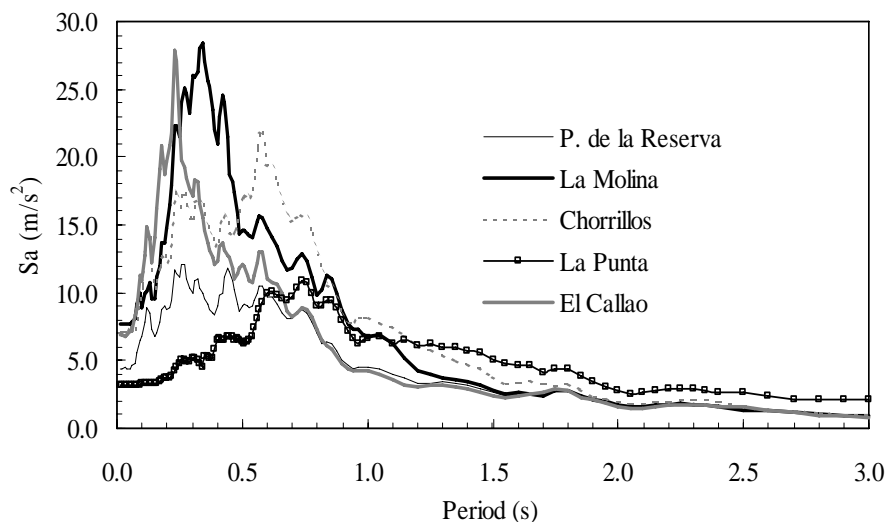
calculado mediante la formula de Newmark [12] y verificado con el programa SAP. Puede observarse que el mayor pico en el espectro de La Molina aparece a unos 0.35 s, valor que podría estar asociado al segundo modo de vibración del depósito (0.2 s para pequeñas deformaciones). En las capas superiores de este depósito se observó una fuerte degradación de rigidez y resistencia a diferencia del depósito de grava de la misma profundidad. Por esto es probable que por la degradación de la capa superior no haya permitido desarrollar los mayores desplazamientos asociados al primer modo, cobrando mayor importancia el segundo modo.

**Tabla 4. Registros de aceleración para el análisis**

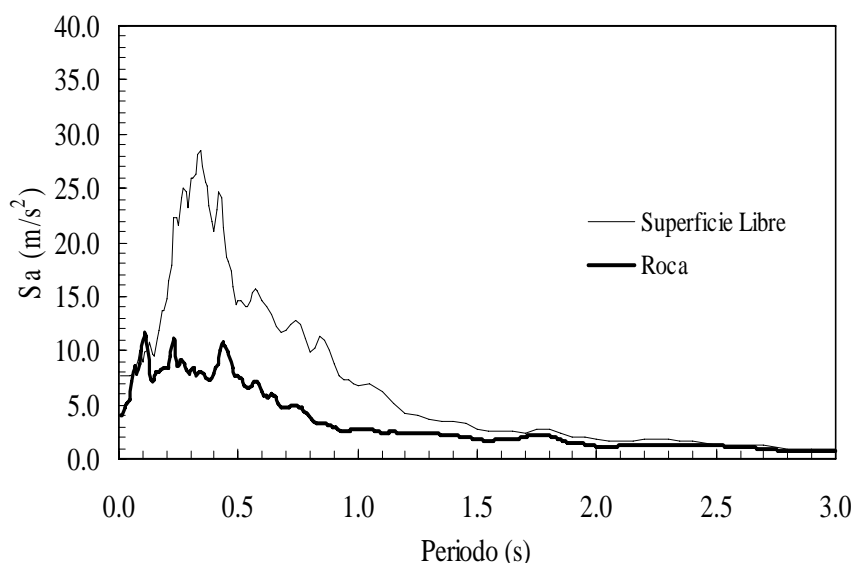
Estación	Sitio	Fecha	M <sub>w</sub>	Coordenadas	Profundidad (km)	Aceleración Pico (G)	Componente
Lima IGP	Suelo	17 Oct 1966	7.5	10.7 78.7	37	0.27 0.18	N08E N82W
Lima IGP	Suelo	31 Mayo 1970	7.9	9.2 78.8	71	0.10 0.11	N08E N82W
Lima IGP	Suelo	3 Oct 1974	8.1	12.3 77.8	21	0.18 0.20	N08E N82W
Lima IGP	Suelo	9 Nov 1974	7.2	12.5 77.8	12	0.07 0.05	N08E N82W
Melipilla, Chile	Roca	3 Mar 1985	8.0	33.2 71.8	17	0.65 0.52	NS EW

**Tabla 5. Respuesta de los 5 depósitos de suelo**

Sitio	Acel. pico en roca m/s <sup>2</sup>	Acel. pico en la superficie del depósito m/s <sup>2</sup>	Amplificación de aceleraciones (*)	Máxima Sa m/s <sup>2</sup>	Amplificación espectral pico
P. de la Reserva	4	4.4	1.1	12.1	2.8
La Molina	4	7.7	1.9	28.5	3.7
Chorrillos	4	7.2	1.8	21.9	3.1
La Punta	4	3.2	0.8	10.9	3.4
El Callao	4	6.9	1.7	27.8	4.0



**Figura 5. Espectros de respuesta Registro de aceleraciones de Lima, 3 Oct. 1974, N82W.**

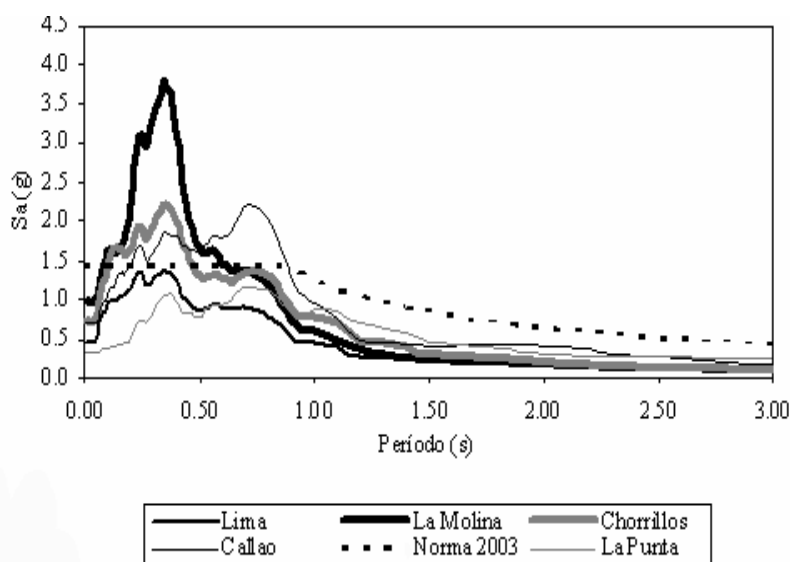


**Figura 4. Espectro de respuesta de aceleraciones en La Molina. Registro en roca P. de la Reserva**

Se puede apreciar (Fig. 5) que los espectros de menores amplitudes son los de Lima y La Punta. Esto se debe en el primer caso a que no existe coincidencia entre las frecuencias del depósito y de la excitación. El depósito del centro de Lima tiene un período natural de alrededor de 1 s, mientras las mayores amplitudes del movimiento en roca son menores que 0.5 segundos. En este caso, la aceleración prácticamente no se amplifica. En el caso de la Punta, el suelo es muy débil para poder amplificar el movimiento sísmico, obteniéndose una aceleración en la superficie menor a la de la roca. Esto fue verificado examinando los diagramas de esfuerzos durante el análisis sísmico. Los espectros de La Molina, Chorrillos y El Callao presentan fuertes amplificaciones de aceleración (1.9, 1.8 y 1.7). Las mayores amplitudes aparecen a menos de 0.5 segundos de período para El Callao y La Molina para mas de 0.5 s para Chorrillos. Asimismo La Molina, Chorrillos y El Callao presentan las mayores amplificaciones espectrales de 3.7, 3.1 y 4.0. Las ordenadas de la Fig. 5 son apreciablemente mayores que las del espectro de la Norma 2003, en el caso de La Molina, Chorrillos y el Callao.

## ANÁLISIS SÍSMICO PROBABILÍSTICO

Cordero [4] calculó los espectros de peligro uniforme para los 5 sitios seleccionados. Se realizó el análisis sísmico probabilístico considerándose como variables aleatorias: la aceleración pico en roca, profundidad del depósito, y un juego de 10 acelerogramas. No se consideró la incertidumbre en las propiedades mecánicas del suelo. Se obtuvo la respuesta en la superficie, espectros de respuesta y espectros de probabilidad uniforme. La distribución de la aceleración pico fue tomada de Monroy y Bolaños [13]. La respuesta del suelo fue calculada con el programa EERA (Bardet[1]). Se siguió el proceso a continuación: (1) Seleccionar un registro de aceleraciones, un valor de la aceleración pico y una profundidad a la roca, (2) Realizar el análisis sísmico del depósito para obtener la respuesta de aceleraciones en el suelo, (3) Calcular los espectros para estas aceleraciones, (4) Obtener la distribución de la aceleración espectral para diferentes períodos naturales. El proceso se repitió para un juego de valores de cada variable, luego de lo cual se calculó el valor espectral de las aceleraciones espectrales para un riesgo determinado. Los espectros para una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años se muestran en la Fig. 6. Sobre la Fig. 6 cabe hacer comentarios similares a los de la Fig. 5, excepto que aparentemente al promediar los espectros en el proceso se observan ahora curvas más suaves para los espectros de Chorrillos y El Callao, no así para La Molina. Puede apreciarse que en el rango de períodos cortos, la respuesta supera al espectro de la norma con un factor S de 1.4.



**Figura 6. Espectros de aceleración en la superficie de los depósitos para 10% de peligro en un período de exposición de 50 años.**

## CONCLUSIONES

El estudio consistió en investigar la respuesta sísmica de diferentes depósitos de suelo en la ciudad de Lima. Los resultados indicaron que independientemente del tipo de suelo (firme o blando) la respuesta en la superficie libre depende de (1) la cercanía entre el período natural del movimiento en roca y el período natural del depósito, y de (2) la resistencia al corte del terreno. En caso de ocurrir esta coincidencia entre los períodos, la amplificación de aceleraciones (suelo/roca) y amplificación espectral tendrán valores mayores. Dependiendo de la resistencia del terreno, el depósito puede verse en la imposibilidad de desarrollar los desplazamientos asociados al primer modo y responder en otro rango de frecuencias. Asimismo, en este caso el espectro de respuesta puede ser apreciablemente mayor que el de la norma. Se calcularon además, los espectros de probabilidad uniforme en cada zona.

## REFERENCIAS

1. Bardet J. P., Ichii K., Lin C. H., "EERA, A computer program for Equivalent-linear Earthquake Site Response Analysis of Layered Soil Deposits", University of Southern California, Los Angeles, 2000.
2. Repetto P., Arango I., Seed H. B., "Influence of Site Characteristics on Building Damage during the October 3, 1974 Lima Earthquake", Report No. UCB/EERC-80/41, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, September 1980.
3. Cordero A., "Amplificación de las Aceleraciones Sísmicas en la Ciudad de Lima," Tesis de Maestría, Escuela de Graduados, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2004.
4. Arce J., "Geometría y Calidad del Acuífero de Lima, 1987. *Simposio Hidrogeología De Lima*, Dpto. de Geología, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
5. Ayquipa C., "Microzonificación Sísmica de Chorrillos y Barranco", Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú, 1995.
6. CISMID, "Proyecto de Reducción de la Vulnerabilidad Sísmica y Diagnostico de Áreas Urbanas y Zonas de Expansión contra Desastres Naturales del Distrito de La Molina", Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Agosto 2002.
7. Chávez O., "Amplificación Sísmica en Algunas Ciudades del Perú", Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1984.
8. Huamán C., "Microzonificación Sísmica de La Punta y el Callao", Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1991.
9. Meneses J., "Evaluación de Acelerogramas y determinación de Espectros de Respuesta en Lima", Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú, 1985.
10. Polo A., "Amplificación Sísmica para Lima Metropolitana por Efecto de las Propiedades del Suelo", Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú, 1977.
11. Bariola J., "Características del Movimiento Sísmico para el Diseño de la Presa del Proyecto Hidroeléctrico El Platanal (Perú)", II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, Madrid, España, 2001.
12. Newmark N, E. Rosenblueth, "Fundamentals of Earthquake Engineering,]" John Wiley, 1971.
13. Monroy M., Bolaños A., "Espectros de Peligro Sísmico Uniforme", Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2004.