

EFECTOS DE LA ENERGÍA DEL SISMO EN LA INTENSIDAD Y LA AMPLIFICACIÓN LOCAL

Gerardo RUÍZ¹ y Heriberto ECHEZURÍA²

RESUMEN

En este trabajo se evalúan en detalle aspectos relacionados con la energía local del sismo, incluyendo la intensidad sísmica y la amplificación local. Tradicionalmente la aceleración máxima del terreno se ha utilizado como indicador de la intensidad por la facilidad de obtención y porque está relacionada con la energía en forma directamente proporcional. No obstante, hay problemas de ingeniería en los que se necesita más información sobre la energía del sismo, como en el desarrollo de presiones de poros y en las amplificaciones locales, donde la aceleración máxima ha demostrado tener serias limitaciones. Una forma de medir la energía del sismo es mediante la definición del sector fuerte del acelerograma, ya que allí se concentran las aceleraciones mayores responsables de la mayoría de los daños. Una de las dificultades para lograr medir adecuadamente la energía del sector fuerte ha sido precisamente la definición de dicho sector en el acelerograma, para lo cual debían utilizarse procedimientos con alto consumo de tiempo. En este trabajo se presenta un nuevo método rápido y efectivo para tal fin. Otro problema relacionado con la energía del sismo es la amplificación de las señales sísmicas en las que tradicionalmente se han utilizado parámetros tales como la profundidad y la velocidad de las ondas de corte promedio del perfil, sin considerar adecuadamente el amortiguamiento promedio del suelo y de las funciones armónicas con mayor energía del sismo. En este artículo se demuestra que las amplificaciones dependen significativamente del amortiguamiento promedio del suelo en el perfil y de las frecuencias (períodos) con mayor energía en el acelerograma en roca. A tal efecto, se incluyen los recientes hallazgos relacionados con este tema.

ABSTRACT

Effects of earthquake energy on local amplification and intensity

In this work, aspects related to the local earthquake energy are evaluated in detail, including the seismic intensity and the local amplification. Traditionally, the maximum acceleration of the ground has been used as an indicator of intensity due to the ease of obtaining it and because it is related to energy in a directly proportional way. However, there are engineering problems where more information on earthquake energy is needed, such as in the development of pore pressures and in local amplifications, where maximum acceleration has proven to have serious limitations. One way to measure the energy of the earthquake is by defining the strong sector of the accelerogram where the major accelerations responsible for most of the damage are concentrated. One of the difficulties in successfully measuring the energy of the strong sector has been precisely the definition of said sector in the accelerogram, for which time consuming procedures had to be used. In this work, a new fast and effective method is presented for this purpose. Another problem related to the energy of the earthquake is the amplification of the seismic signals where traditionally parameters such as the depth and velocity of the average shear waves of the profile have been used, without adequately considering the average damping of the soil and the harmonic functions with greater energy from the earthquake. This article shows that the amplifications depend significantly on the average damping of the soil in the profile and on the frequencies (periods) with higher energy in the rock accelerogram. To this end, recent findings related to this topic are included.

Palabras clave: respuesta dinámica, perfil geotécnico, desarrollo de presión de poros, intensidad del sector fuerte del acelerograma.

Keywords: dynamic response, geotechnical profile, pore pressure development, strong sector of the accelerogram.

INTRODUCCIÓN

El desempeño de las estructuras calculadas con métodos sismorresistentes depende de las condiciones del sitio donde

reposan por los denominados efectos locales (Kramer, 1996). En este sentido, la ocurrencia de licuación puede producir un cambio importante en las condiciones del suelo y generar

¹ Ingeniero civil UCAB, consultor en Geotecnia, Vicsa INC (USA). Correo-e.: Ing.gerdruiz@gmail.com

² Engineer (Post MSc). Presidente de la Sociedad Venezolana de Geotecnia, Profesor Asociado retirado UCAB, UCV, USB, Caracas, Venezuela Correo-e.: hechezuria51@gmail.com

asentamientos bruscos o colapso de las estructuras sobre o adyacentes a la zona en estudio.

Aunque la potencial ocurrencia de licuación ha sido extensamente estudiada considerando la aceleración máxima del terreno (Seed-Idriss, 1971; Kramer, 1996; Idriss and Boulanger, 2004; Brenes, 2008; Obando, 2009), pero en los últimos años, los estudios realizados por Echezuría (2018) sugieren que la amplificación de la aceleración máxima del terreno para suelos blandos de Idriss (1990) podría ser una condición necesaria pero no suficiente para alcanzar los valores de energía requeridos para que se desarrolle la licuación en estratos arenosos superficiales; tal como se mostrará más adelante en este artículo. La energía del sismo utilizada en este trabajo es medida como la intensidad del sector fuerte del acelerograma definida por Echezuría (2015, 2017) la cual se incluye a continuación:

$$I_{sm} (HE) = Arms^2 \times T_{sm} \quad (1)$$

Donde, T_{sm} es la duración del sector fuerte del acelerograma y $Arms^2$ es la potencia promedio del sector fuerte del acelerograma. El término I_{sm} define la energía asociada con el sector fuerte del acelerograma que es equivalente a una potencia promedio, $Arms^2$, que actúa durante un tiempo (T_{sm}).

En su trabajo, Idriss (1990) plantea con base en la aceleración máxima en roca de un sismo, un aproximado de la máxima aceleración de dicho evento al ser transitado por un perfil geotécnico de suelos blandos como se aprecia en la figura 1A. No obstante, esta correlación presenta limitaciones, al no considerar las amplificaciones que pueden ocurrir en el perfil el cual puede contener otra variedad de suelos. Esto se observa en la figura 1B donde los espectros de respuesta en superficie amplifican significativamente las ordenadas espectrales, mientras que las amplificaciones de la aceleración máxima del terreno tienen un rango muy limitado.

La figura 1C contiene sismos, cuyos períodos –con las mayores amplitudes de las ordenadas espectrales (alta energía)– están cercanos al período fundamental del depósito. Se observa para dichos sismos que la energía del sector fuerte del acelerograma en roca (abscisas), amplifican significativamente e independientemente de la magnitud (nótese que la escala es logarítmica). La figura 1D muestra que la seudo energía de las ordenadas espectrales aumenta al igual que lo hace la energía del sector fuerte del sismo, justo antes de alcanzar al estrato licuable (quiebre). De tal manera que, como corolario de lo antes expuesto, la energía medida en función de la aceleración máxima del terreno no es suficiente para describir el proceso de licuación en un perfil geotécnico, siendo la energía del sector fuerte del sismo (o las ordenadas espectrales) en el sitio la que controla dicho proceso.

Es importante destacar que los sismos contenidos en la figura 1C son los 62 que lograron licuar la arena en los primeros 20 m del sitio Treasure Island de un total de 206 sismos estudiados por Ruiz (2019). Ruiz estudió dicho sitio con el programa DEEPSOIL (Hashash y otros, 2017), tanto con un método equivalente lineal como con otro no lineal acoplado con un modelo de generación de presión de poros incluido en dicho programa (Matasovic y Vucetic, 1992), para evidenciar los cambios en energía justo antes de alcanzar el estrato licuable, definiendo la metodología del estrato de quiebre. También Ruiz evidenció que algunos sismos que precedían licuación con el método basado en la aceleración pico, causaban muy poco o ningún incremento de la presión de poros con el método no lineal acoplado. Esto también fue observado por Herrera y Muñoz (2018) con el método equivalente lineal y usando el mismo programa. En consecuencia, hay más participación de la energía del sismo en el proceso de licuación que la involucrada en la aceleración máxima del terreno solamente. Lo anterior es de esperar ya que es conocida la importancia de la duración de la excitación (ciclos de carga y descarga repetidos) que la aceleración máxima del sismo, la cual es un valor único e instantáneo (Kramer, 1996; Echezuría, 2017 y 2018).

El hecho de que la amplificación es necesaria para que ocurra la licuación se corrobora en la figura 2A donde se muestra la correlación de Ambraseys y Menu (1988) entre las distancias hasta las cuales se ha evidenciado la ocurrencia de licuación para distintas magnitudes de momento. Nótese que las distancias a las que se ha observado la ocurrencia de licuación para cualquiera de dichas magnitudes tienden a estar cercanas a la línea límite, es decir, alejadas de las fuentes. Se han señalado además en la figura 2A las distancias epicentrales máximas en donde se evidencia la ocurrencia de licuación para las magnitudes de momento 5,5 - 6,5 y 7,5, las cuales son 7 km, 50 km y 200 km, respectivamente.

Por otra parte, Echezuría (2018) realizó un estimado de la energía necesaria para la ocurrencia de licuación para distintas magnitudes a partir de datos de ensayos cíclicos existentes en la literatura y de las ecuaciones típicas para la aplicación del método CSR, propuesto por Seed e Idriss (1971), los cuales se incluyen en la tabla 1. Los valores de esta tabla se graficaron en la figura 2B junto con la ley de atenuación encontrada por Herrera y Muñoz (2018) para la intensidad del sector fuerte del sismo definida por Echezuría (2017), con la distancia epicentral. Como se aprecia en esta figura, para las tres magnitudes seleccionadas, los valores de la energía requeridos para licuar son mucho mayores que las energías promedias mostradas por la ley de atenuación para el sector fuerte del acelerograma a las distancias límites identificadas en la figura 2A. Esto reitera que debe haber otro aspecto relacionado con la amplificación de la energía del sismo hasta alcanzar la requerida para la licuación, la cual es de varios órdenes de magnitud ya que el gráfico está en escala logarítmica.

Tabla 1. Energía estimada para alcanzar la licuación para diferentes magnitudes de momento y distancias epicentrales.

Magnitud de momento	5,5	6,5	7,5
Distancia límite (km)	6,5	50	200
Ism en roca a las distancias límites para la magnitud (cm^4/s^3)	9000	3900	210
Rango de Ism para licuación (cm^4/s^3)	76.321	80.993	106.768
	a	a	a
	76.768	114.221	172.607

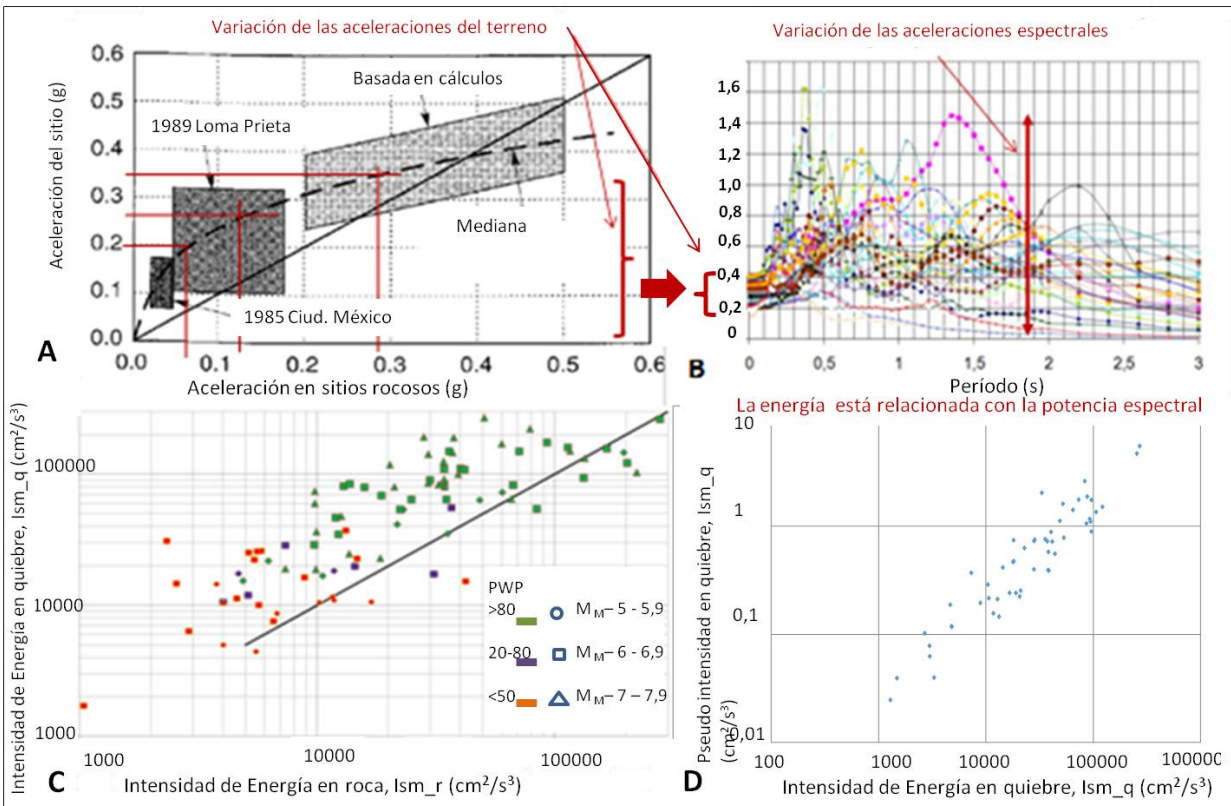


Figura 1. Comparación de la amplificación de la energía con la de la aceleración pico del terreno. A) Relación entre aceleración pico en roca con la aceleración en superficie (Modificado de Idriss, 1990). B) Variación de las Aceleraciones espectrales (Modificado de Echezuría, 2020). C) Intensidad de energía en roca vs Intensidad de energía en quiebre (Modificado de Ruiz, 2019). D) Sudo Energía de las ordenadas Espectrales en quiebre vs Ism en el Quiebre. (Modificado de Anato, 2020.)

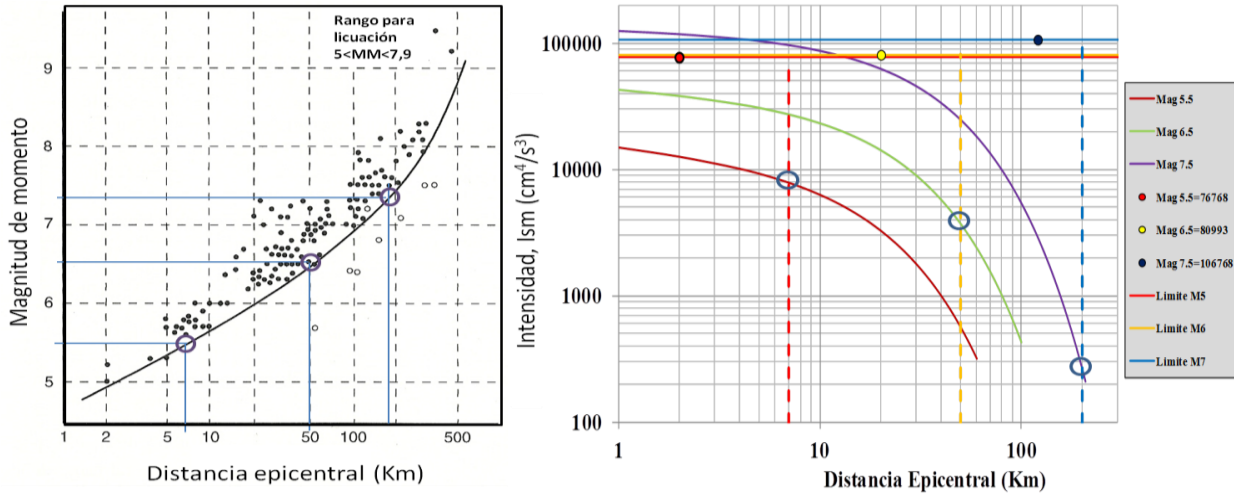


Figura 2. Potencial de Licuación con magnitud y distancia epicentral (Modificado de Herrera y Muñoz, 2018).

CÓMO OCURRE LA AMPLIFICACIÓN LOCAL DE LA ENERGÍA

Al indagar en cuáles sismos tendrían amplitudes de las ordenadas espectrales que amplifiquen suficiente para causar licuación, Echezuría (2020) identificó que los sismos licuadores antes referidos en el trabajo de Ruiz (2019), presentan cuatro formas espectrales típicas con distintas localizaciones, las cuales se muestran de manera esquemática en la figura 3. Por otra parte, se sabe que el período fundamental del depósito es independiente del tipo de suelo ya que solo depende del espesor, H , y la rigidez (módulo de corte), G , el cual depende de la velocidad de las ondas de corte, V_s , de acuerdo con la siguiente expresión propuesta por Dobry y otros (1975):

$$T_0 = 4 * H / V_s \quad (2)$$

Sin embargo, la amplitud de la amplificación sí depende del tipo de material debido a que la función de amplificación dinámica, $|F_2(\omega)|$, depende del amortiguamiento, ϵ , tal como se indica en la ecuación que mostraremos a continuación (Kramer, 1996), con, w , como la frecuencia:

$$|F_2(\omega)| \approx \frac{1}{\sqrt{\cos^2(w*H/V_s) + [\epsilon*(w*H/V_s)]^2}} \quad (3)$$

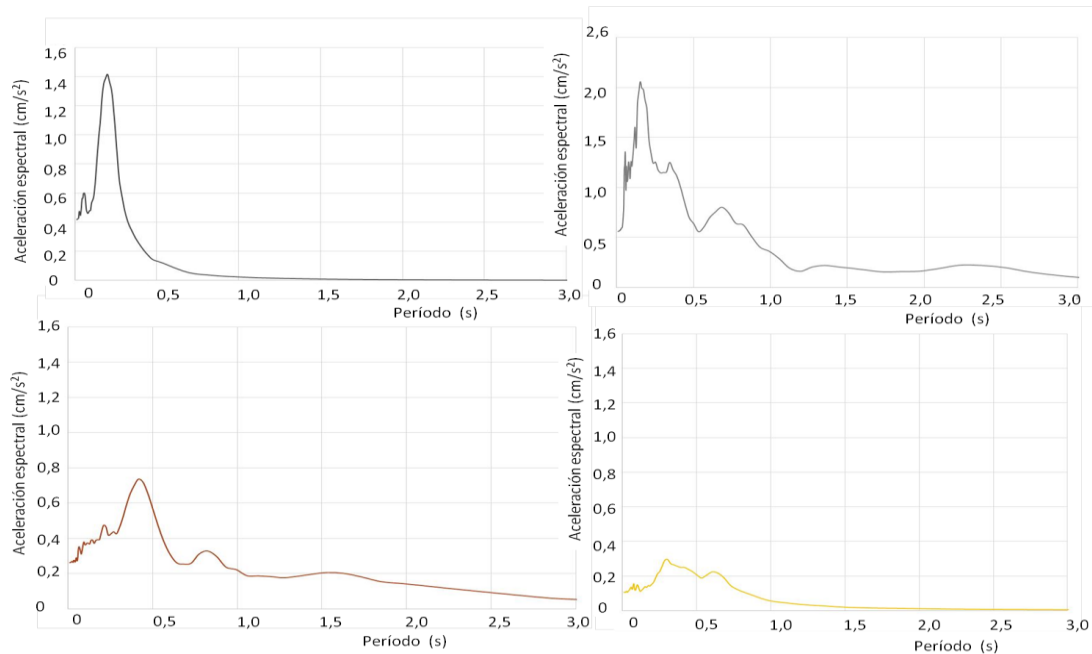


Figura 3. Esquemas de las formas espectrales más frecuentes encontradas en estudios de amplificación por respuesta de perfiles

Eso quiere decir que, si el perfil es predominantemente arcilloso, se tendrá una mayor amplificación de la energía del sismo ya que las arcillas tienen menor amortiguamiento que las arenas según se ilustra en la figura 4. Adicionalmente, el amortiguamiento de las arcillas depende del índice de plasticidad (IP), por lo que las arcillas de alta plasticidad amortiguan menos que las de baja plasticidad (ver figura 4)

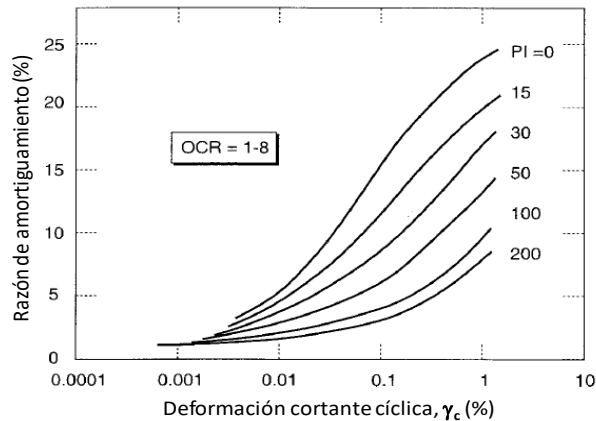


Figura 4. Razón de amortiguamiento con deformación cortante cíclica (Tomado de Vucetic y Dobry, 1991).

Las amplificaciones están asociadas con las frecuencias en las que ocurren los máximos de la función de transferencia, $|F_2(\omega)|$, la cual se muestra esquemáticamente en la figura 5. Las componentes armónicas del espectro de Fourier del sismo en roca serán amplificadas por la función $|F_2(\omega)|$. Cuando esta función de transferencia se grafica con los períodos en lugar de las frecuencias, la máxima amplificación ocurre para el período fundamental del depósito, tal como se aprecia en la figura 6.

En la misma figura 6 se evidencia la transformación del espectro de respuesta en roca por la función de transferencia al espectro de respuesta en superficie. En ese caso, el sismo en roca contiene amplitudes espectrales alrededor de 0,2 g en las inmediaciones del período fundamental que se ubica cercano a 1,51 s. Esas amplitudes pasaron a prácticamente 1g en el espectro de respuesta en la superficie del terreno, cuando se utiliza la función de transferencia de arcilla de alta plasticidad.

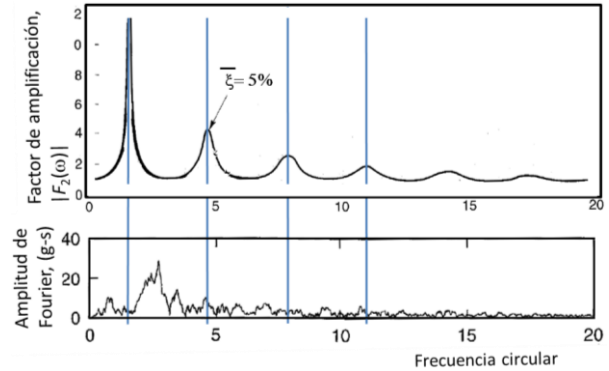


Figura 5. Amplitud de Fourier (g-s) y factor de amplificación $|F_2(\omega)|$ (Modificado de Kramer, 1996).

En la misma figura (6) se incluye el efecto del amortiguamiento en dicha función con la curva amarilla. Se observa en esa figura que las amplificaciones son máximas para esas condiciones en las cercanías del período fundamental, como se esperaba. Por otra parte, en la figura 7 se ilustra el mismo sitio, pero con otro sismo en roca cuyas amplitudes espectrales son muy cercanas a cero, y se evidencia que las amplificaciones son prácticamente nulas también para el espectro de respuesta en superficie.

Es de hacer notar en la figura 6 que, por inspección de las ordenadas espectrales, la energía del espectro de respuesta en la superficie es mayor que la del espectro en roca, lo cual denota que ha ocurrido un aumento de la energía del sismo. Contrariamente, en la figura 7 se ve que la energía del sismo en superficie es apenas más grande que la del sismo en roca, con lo cual se infiere que hubo muy poca amplificación.

Adicionalmente, las aceleraciones del terreno en el sismo de la figura 6 aumentan un poco al pasar de aproximadamente 0,25 g a cerca de 0,35 g. Para el sismo de la figura 7, la aceleración del terreno se mantiene en 0,4 g tanto en superficie como en roca. Ahora bien, al aplicar el método del CSR, con ambos sismos se obtiene que las arenas en el perfil de Treasure Island debieran licuar. Sin embargo, al realizar el análisis de repuesta con el método no lineal acoplado resulta que el sismo de la figura 7 no genera prácticamente presión de poros, mientras que el de la figura 6 sí alcanza entre el 90% y 95% de presión de poros, como porcentaje del esfuerzo vertical efectivo (Ruiz, 2019)

- Para Treasure Island con un período fundamental $T_0=1,55$ se tiene para un sismo:

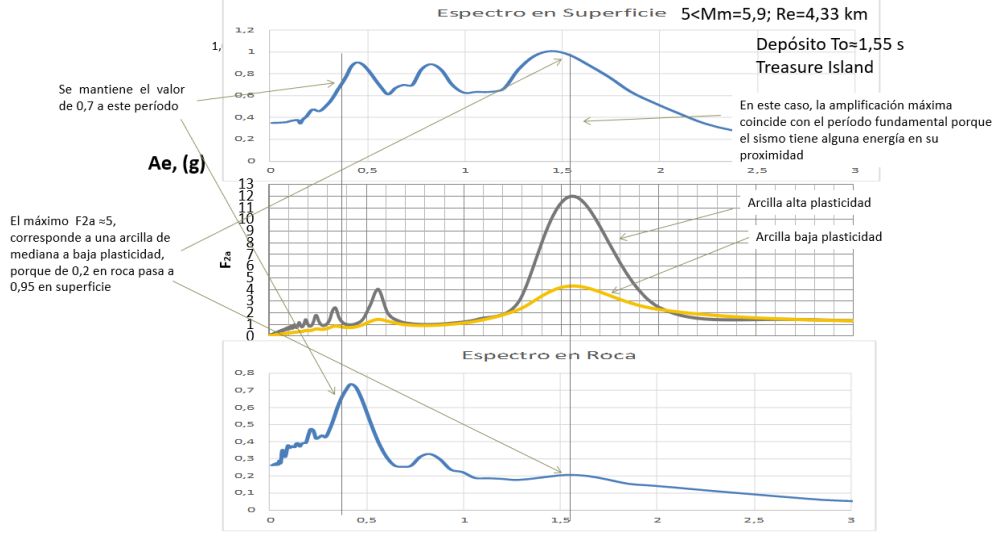


Figura 6. Coincidencia de la función de amplificación $|F_{2(\omega)}|$ con la amplificación de la respuesta en superficie. Con respecto al período fundamental. $M_w=5,9$ $Re=4,33$ km.

- Para Treasure Island con un período fundamental $T_0=1,55$ se tiene para un sismo:

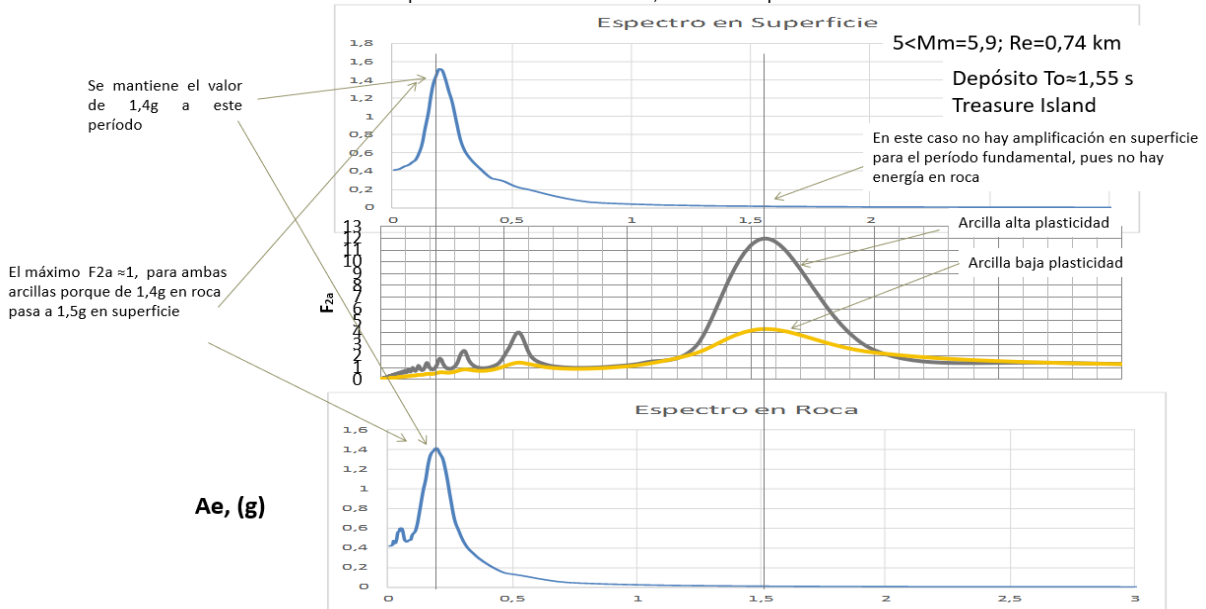


Figura 7. Coincidencia de la función de amplificación $|F_{2(\omega)}|$ con la amplificación de la respuesta en superficie. Con respecto al período fundamental, $M_w: 5,9$ $Re: 0,74$ km.

La dependencia de la función de transferencia $|F_{2(\omega)}|$ con el amortiguamiento se ilustra en la figura 8A, donde se aprecia que el pico de amplificación para una arcilla con alta plasticidad (IP=100, curva gris) es mucho mayor que para la arcilla de baja plasticidad (IP=15, curva amarilla). En la figura 8B, varios espectros de respuesta en superficie fueron normalizados por sus correspondientes en roca (ver las ordenadas) y los períodos fueron normalizados por el período fundamental del depósito. Se ve en esa figura que, además de la máxima amplitud en el período fundamental, el segundo pico de la función de

transferencia también tiene un rol significativo en la amplificación de las ordenadas espectrales, no así para las aceleraciones en la superficie del terreno.

Por otra parte, dependiendo de la ubicación de esos picos y los valores de las ordenadas del sismo en roca en las proximidades de los mismos, las mayores amplificaciones pueden oscilar alrededor del período fundamental y el período del segundo pico y ese efecto es independiente de la distancia y la magnitud. Eso se muestra en la figura 9.

La implicación de lo señalado en los párrafos anteriores es que los períodos que concentran la energía del sismo en roca controlarán la amplificación, dependiendo de la localización de los períodos de los dos picos importantes de la función de transferencia o amplificación del terreno. En otras palabras, para un sitio cualquiera con período fundamental y función de transferencia dados por sus condiciones locales, la amplificación de la energía del sismo está sujeta a que esos sismos contengan energía en los períodos de los dos picos importantes de la función de transferencia. Los sismos que no cumplen con esas condiciones no experimentarán ningún incremento de energía o, inclusive podrían experimentar una reducción de la misma.

En consecuencia, la licuación es un proceso que implica energía y, por tanto, debe haber un nivel mínimo de la misma bien sea porque el sismo es rico en energía por la proximidad a la fuente o porque las condiciones locales la amplifican. De

nuevo, es oportuno señalar el gráfico de la figura 2 donde se evidencia que la ocurrencia de licuación observada se localiza hacia las distancias extremas para cada magnitud (figura 2A) y las amplificaciones de la energía observadas para sismos de distintas magnitudes (figura 2B).

Ese mismo razonamiento aplica a la definición de espectros de diseño en estudios de microzonificación sísmica pues las máximas amplificaciones estarán controladas por sismos que cumplan con los aspectos antes citados. En consecuencia, es necesario comenzar a estudiar la potencialidad de las fallas aledañas a los sitios (regiones) estudiadas en la microzonificación para generar sismos con las características de los incluidos en la figura 3. De no hacerlo así, se estaría introduciendo factores de amplificación que no necesariamente aplicarían a las condiciones de las fallas que controlan la amenaza en el sitio.

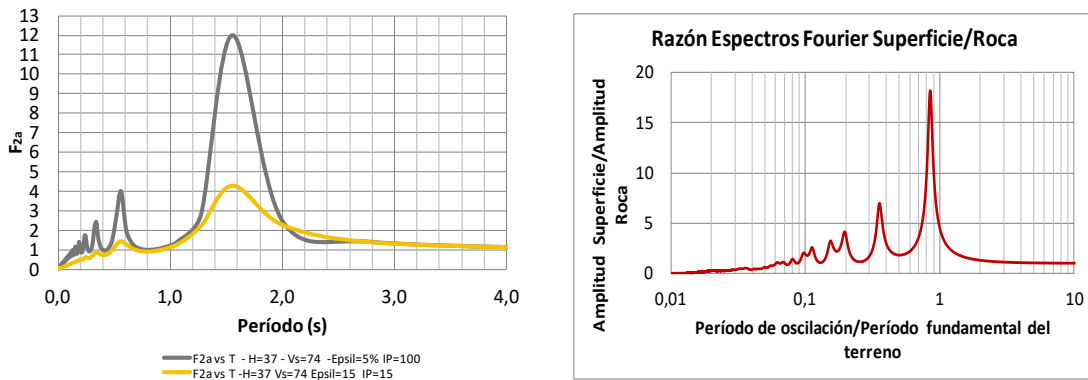


Figura 8. Comparación del factor de amplificación $|F_{2a}(\omega)|$ con la relación de amplitudes espectrales vs el período para espectros de respuesta en superficie y roca.

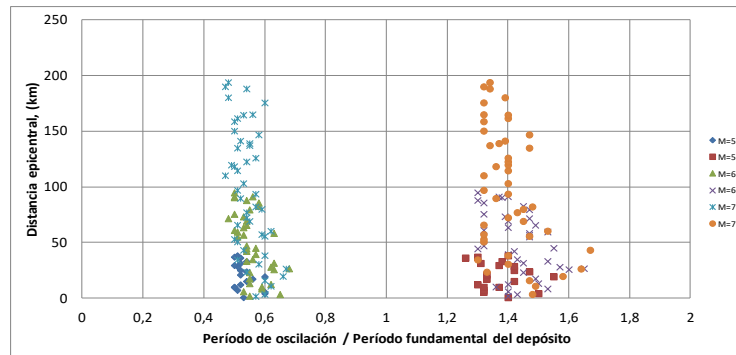


Figura 9. Correlación del factor de amplificación $|F_{2a}|$ con la distancia epicentral.

DETERMINACIÓN DEL SECTOR FUERTE DEL SISMO

Echezuría (2017) propuso un método para determinar el sector fuerte del acelerograma y la energía asociada con el mismo como medida de la intensidad. Ese método está basado en la definición de energía indicada en la ecuación (1) y coincide muy bien con el de Mc Cann y Shah (1980), que está basado en un principio parecido y, por lo tanto, son adecuados y

congruentes además de repetibles, para establecer el sector fuerte del acelerograma y la energía asociada con el mismo.

Ese método de Echezuría fue probado por Herrera y Muñoz (2018) y Ruiz (2019) mediante análisis de respuesta dinámica de perfiles geotécnicos para estudios de licuación. Ese método de cálculo, al igual que el de Mc Cann y Shah, involucra mucho tiempo y es bastante engorroso porque se deben calcular tanto el inicio como el fin del sector fuerte tomando las aceleraciones

en ambas direcciones del acelerograma (Echezuría, 2017). Es por ello que Echezuría (2020) continuó investigado nuevas formas más eficientes y rápidas para determinar la energía del sector fuerte del sismo y desarrolló un método nuevo para establecer tal sector de manera más eficiente, el cual se presenta a continuación.

La nueva metodología de Echezuría (2020) consiste en determinar las varianzas de las aceleraciones del registro sísmico desde el inicio del sismo hasta el final, dando como resultado una pseudo función de potencia, A_{rms}^2 . El siguiente paso es calcular el porcentaje de la función de varianza respecto al valor de la varianza al final del acelerograma. En otras palabras: se dividen los valores de la varianza desde el inicio hasta el fin del acelerograma entre la última varianza calculada al final del acelerograma y se multiplica ese cociente por 100. Seguidamente, los porcentajes son graficados con el tiempo del acelerograma con lo cual se obtiene la curva de pseudo-potencia que tiene la misma forma que la función de potencia real, solo que exagerando los valores de la misma, tal como se ilustra en la figura 10.

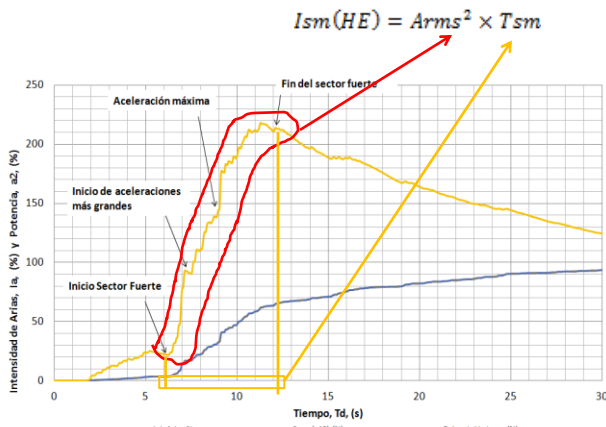


Figura 10. Metodología para estimar la duración del sector fuerte del acelerograma basado en la curva de pseudo-potencia de aceleración, la cual exagera la función de potencia real.

De la curva de potencia exagerada se obtiene la duración del sector fuerte del acelerograma considerando los quiebres de su rama ascendente (rama de la izquierda), los cuales representan los cambios en las amplitudes de las aceleraciones en el acelerograma, tal como se detalla en la figura 10. Es importante destacar que esos cambios son virtualmente fijos de acuerdo con las características de las aceleraciones en los acelerogramas. Lo que difiere son los tiempos en los cuales ocurren los mismos.

En consecuencia, se identifica claramente el inicio del sector fuerte como el primer cambio brusco en la rama ascendente. Luego, en cada modificación de la función de pseudo potencia con descenso marcado se encuentran los cambios de valores importantes en el acelerograma. El primero, como se mencionó antes, es cuando comienzan a crecer las aceleraciones antes de alcanzar la aceleración pico, la cual muestra un salto casi vertical. Una vez alcanzado el punto de

máximo crecimiento relativo de la función de pseudo-potencia, se inicia un descenso continuo de las mismas, debido a que allí empiezan a decrecer las aceleraciones. El primer punto donde se consiga un incremento pequeño luego del pico que marca el descenso continuado del valor relativo de la varianza, marca el final del sector fuerte. La duración del sector fuerte está dada por la diferencia del tiempo del último punto con el del inicio. Estas duraciones del nuevo método Echezuría (2020) coinciden bastante bien con las calculadas con los métodos de Mc Cann-Shah (1980) y de Echezuría (2017).

Una vez determinada la duración del sector fuerte, se calcula la varianza de las aceleraciones comprendidas entre el punto de inicio y el punto final del sector fuerte para obtener la potencia del mismo. Finalmente, se calcula la energía del sector fuerte (I_{sm}) multiplicando las varianzas de ese sector por la duración del mismo, al igual que en la ec.(1). Las duraciones y las intensidades del sector fuerte de los acelerogramas incluidos en la base de datos de este estudio se determinaron con ambos métodos de Echezuría (2017 y 2020).

La otra curva en la figura 10 es la intensidad de Arias (1970), la cual de acuerdo con Echezuría (2017) es siempre creciente al igual que la I_{sm} . Se observa en la figura 10 que la pendiente con que crece la intensidad de Arias al inicio del sismo es mayor que la pendiente de dicha gráfica después del punto donde termina el sector fuerte del acelerograma. Eso se debe a que la intensidad es el producto de la potencia por la duración y esta última siempre es un número creciente. En consecuencia, a pesar de que la potencia decrece después del punto donde termina el sector fuerte del acelerograma, la intensidad continúa aumentando, aunque con pendiente menor tal como se evidencia en la figura 10. Por ello la potencia es un mejor indicador para establecer la duración del sector fuerte del acelerograma que la intensidad o la energía. Esto es ampliamente discutido en Echezuría (2017).

CONCLUSIONES

Se corrobora que la energía del sector fuerte del acelerograma, I_{sm} , es una mejor variable que la aceleración máxima del terreno para evaluar procesos en los que la amplificación local es importante, tal como la ocurrencia de licuación en arenas. Esto se debe a que la amplificación de la energía del sismo debe darse para que ocurra licuación y que la energía del sismo correlaciona muy bien con la pseudo energía calculada a partir del espectro de respuesta.

Se presenta un nuevo método rápido y efectivo propuesto por Echezuría, para establecer el sector fuerte del acelerograma que es compatible con otros que han demostrado ser los más adaptados a las variables que controlan la medición de la potencia y la intensidad del sismo basada en energía. Este método permite estimar en forma expedita el sector fuerte del acelerograma para aplicaciones futuras basadas en la energía del sismo en distintos problemas de ingeniería.

Se demuestra también en este artículo que las amplificaciones de la energía de los acelerogramas dependen significativamente

del amortiguamiento promedio del suelo en el perfil y de la proximidad de las frecuencias (períodos) con mayor energía en el acelerograma en roca con el período fundamental del perfil. No obstante, la función de transferencia controla el valor máximo de dicha amplificación y un mismo sismo puede amplificar hasta por un factor de 12 en un suelo de alta plasticidad, pero solamente con un factor cercano a 3 en una arcilla de baja plasticidad o arena.

Lo anterior implica que es necesario atender a la forma del espectro de respuesta del sismo pues los períodos de mayores amplitudes de las ordenadas espectrales (mayor energía), son los que amplificarán las amplitudes del sismo resultante en la superficie del terreno. Se indica en este trabajo, también, que hasta ahora se han identificado cuatro formas espectrales básicas para los sismos en roca y se recomienda investigar más en relación a la potencial generación de dichas formas espectrales por las actividades de las fallas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambraseys N. N and J.M. Menu. 1988. Earthquake-Induced Ground Displacements, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.16, 985-1006.
- Anato, J. 2020. Influencia de las amplitudes, las amplificaciones espectrales de fourier y el periodo fundamental del perfil geotécnico en el potencial de licuación. Tesis de Grado Ing. Civil, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela. 18-20, 38-53 p.
- Brenes. F. 2008. Evaluación del potencial de licuefacción en suelo. Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 22-45 p.
- Dobry, R., I. Oweis and A. Urzua. 197). Simplified procedures for estimating the fundamental period of a soil profile, *Bull. Seism. Soc. Amer.* 66(4), pp. 1293-1321.
- Dobry, R.; T. Abdoun, M.; K. H. Stokoe II; R. E. S. Moss; M. Hatton, A.; and H. El Ganainy, A. 2015. Liquefaction Potential of Recent Fills versus Natural Sands Located in High-Seismicity Regions Using Shear-Wave Velocity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 141(3):04014112 • March.
- Echezuría H. 2015. Comparing ground motion intensity, root mean square of acceleration and time duration from four definitions of strong motion, *The Open Civil Engineering Journal*, 9, 1-14 p.
- Echezuría, H. 2017. Earthquake strong motion duration: Unifying criteria for definition and a new method to calculate it, *Tekhné*, Vol.20, No.2, pp 39-50.
- Echezuría, H. 2018. Potencial de licuación utilizando la intensidad del sector fuerte del sismo. XVI Congreso Colombiano de Geotecnia & IV Seminario Internacional de Ingeniería Sismo-Geotécnica. Paipa, Colombia, 7 al 10 de noviembre de 2018.
- Echezuría, H. 2020. La energía sísmica en la fuente. La energía del acelerograma como intensidad. El sector fuerte del acelerograma. La amplificación de la señal sísmica. Presentación de avance de investigación, Saber UCAB. Julio.
- Herrera, D., H. Muñoz. 2018. Análisis de la intensidad del sector fuerte del acelerograma para establecer el potencial de licuación. Tesis de Grado Ing. Civil, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela, 26-47 p.
- Hashash, Y.M.A., M.I. Musgrove, J.A. Harmon, O. Ilhan, D.R. Groholski, C.A. Phillips, and D.Park. 2017. DEEPSOIL 7.0, User Manual Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns, 40-79 p.
- Idriss, I.M. 1990. Response of soft soil sites during earthquakes. H.B. Seed Memorial Symposium, (J.M. Duncan, ed.), *BiTech Publishers*, Vancouver, 273-290.
- Kramer, S. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall International Series, New Jersey, USA, 254-294 p.
- McCann, M. W. & Shah, H.C. 1980. RMS acceleration and duration of strong ground motion (No. 46). Stanford Univ.
- Matasovic, N. and M. Vucetic. 1992. Pore pressure model for cyclic straining of clay, *Soils and Foundations*, Jap. Soc, Soil Mech. Found. Eng., 32 (3): 156-173.
- Obando, T. 2009. Metodología y técnicas para la cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a solicitaciones dinámicas. Ejemplo de casos Universidad de Andalucía, Huelva, España. 2-28 p. <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/cuantificacion-potencial-licuacion-suelos/cuantificacion-potencial-licuacion-suelos.pdf>
- Pass, D.G. 1991. Soil Characterization of the deep accelerometer site at Treasure Island, San Francisco, California, Tesis de Maestría, University of New Hampshire, 76-145 p.
- Ruiz, G. 2019. Análisis de la intensidad del sector fuerte del acelerograma considerando el desarrollo de la presión de poros en un perfil geotécnico. Tesis de Grado Ing. Civil, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela, 22-34, 44-72 p.
- Seed, H. B. and I. M. Idriss 1971 Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.107, No. SM9, pp 1249-1274.
- T. L. Youd, I. M. Idriss 200). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* . Vol. 127, 297-310 p