

ESPECTRO DE DISEÑO EN LA CERCANÍA A FALLAS ACTIVAS TRANSCURRENTES

JOSÉ DOMINGO ALVIAR MALABET

Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio

Geohidra Consultores C.A.

email: jdalviar@gmail.com

Recibido: mayo 2016

Aprobado para publicación: julio 2016

RESUMEN

Basado en la metodología desarrollada para generar espectros de diseño por grado de confiabilidad, 90 %, 95 % o 98 %, en correspondencia con periodos de retorno de 475, 975 y 2.475 años en estructuras con 50 años de vida útil, se presenta un método para obtener los espectros de diseño en la cercanía a fallas activas del tipo transcurrente, con magnitudes menores o iguales a 8, utilizando bases de datos sismológicas, complementado con estudios de propagación de ondas y la tipología del perfil de suelo. El método es útil a la hora de definir los espectros de diseño de estructuras esenciales que se ubiquen en la cercanía a fallas activas.

Palabras clave: espectro de diseño, fallas activas, confiabilidad, estructuras esenciales

DESIGN SPECTRA CLOSE TO TRANSCURRENT ACTIVE FAULTS

ABSTRACT

Based on the methodology developed to generate design spectra by degree of reliability, 90%, 95% or 98%, in correspondence with return periods of 475, 975 and 2,475 years in structures with 50 years of useful life, a method is presented to obtain the design spectra considering the proximity to transcurrent active faults, with magnitudes less than or equal to 8, using seismological data, complemented by studies of wave propagation and the type of soil profile. This method is useful to define the design spectra of essential structures located near active faults.

Keywords: design spectra, transcurrent active faults, reliability, essential structures

ANTECEDENTES

De la revisión consultada en la literatura con relación a la obtención de los espectros de diseño en la cercanía a fallas activas se puede mencionar la **Norma UBC 97, The International Building Code (IBC-2000)** y varios artículos en los cuales se hacen comparaciones entre los espectros obtenidos por los autores y los derivados de la norma UBC-97.

En la norma UBC-97 se definen cuatro zonas sísmicas en los Estados Unidos, de las cuales, sólo a la zona 4, los valores de las ordenadas espectrales (Ca y Cv) que se muestran en la Figura 1, se ven afectados por unos factores Na y Nv que dependen de la distancia a las fallas activas y el tipo de fuente sísmica como se indica en las tablas 1 a 5 que se anexan.

Se definen tres tipos de fuentes sísmicas A, B y C cuya selección depende de la magnitud del sismo y la tasa de movimiento anual como se muestra en la tabla 5.

Los valores de Ca y Cv son variables y atienden al tipo de suelo y de la zona objeto de estudio indicado en el mapa de zonificación sísmica.

De la norma UBC-97 se puede inferir que en la cercanía a fallas activas la aceleración espectral para período cero puede alcanzar un valor de 0,66 g y el valor máximo de la meseta del espectro puede llegar a 1,65 g. Estos valores han sido calculados considerando un 10 por ciento de probabilidad de excedencia en 50 años para la aceleración esperada en el mapa de zonificación sísmica.

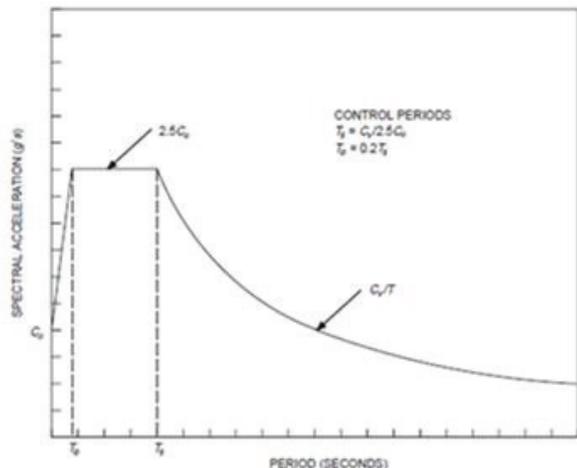


Figura 1. Espectro de diseño utilizando factores de amplificación de respuesta C_a y C_v (UBC-97)

Aun cuando la norma UBC-97 no lo indica y no se establece una relación entre los niveles de probabilidad de ocurrencia de las ordenadas espectrales con los valores de amenaza, comúnmente se calculan para el valor medio más una desviación estándar, lo cual se corresponde con un 84 % de grado de confiabilidad en una distribución normal.

Por otra parte, en The International Building Code (IBC-2000), se ha propuesto una metodología la cual se basa en el estudio probabilístico de las leyes de atenuación desarrolladas en EEUU e implementada por la USGS, que aparte de predecir la aceleración máxima en roca a una cierta distancia de la fuente, también calcula las ordenadas espectrales para períodos de 0,2 s y 1 s. Dichas ordenadas espectrales están a la disposición para todo el país, a través de mapas y calculadas para diferentes períodos de retorno y probabilidades de ocurrencia. Conocidos los dos valores en las ordenadas espectrales para períodos de 0,2 s y 1 s, con probabilidad de excedencia de 2 % en 50 años, en roca, se hace la corrección o ajuste por tipo de suelo en el perfil a través del parámetro V_{s30} (promedio de velocidades de ondas de corte en los primeros 30 m del perfil). El espectro de diseño resulta al multiplicar por 2/3 las ordenadas espectrales del espectro anteriormente indicado.

Los valores de las ordenadas espectrales, considerando la distancia a las fallas activas han sido determinados a partir de leyes de atenuación muy elaboradas, en un proyecto llevado a cabo en la costa pacífica de los Estados Unidos, conocido como NGA (next generation attenuation).

Varios investigadores como Campbell, Bozorgnia, Idriss, Abrahamson, Boore, Chiou, Silva y Youngs han incorporado en los modelos o leyes de atenuación parámetros como la magnitud del sismo, la distancia a la fuente, el mecanismo de falla, la profundidad al tope de la ruptura, la velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 m del depósito (V_{s30}), la profundidad a la cual se consigue la roca con velocidad de ondas de corte de 1,5 km/s, entre otras variables, para determinar la aceleración espectral por período de vibración, donde se incluyen tablas donde se muestran los coeficientes que resultan al hacer el ajuste multivariable, así como la desviación estándar asociada a cada período de vibración.

De las metodologías consultadas y revisión de la literatura relacionada con la determinación de los espectros de diseño en la cercanía a fallas activas, las mismas son aplicables exclusivamente a los Estados Unidos, por cuanto los mapas de zonificación así como las características o propiedades de las fallas activas, en los que se incluyen parámetros como profundidad a la cual se consiguen velocidades de ondas de corte de 1,5 km/s son propias de ese país.

En un estudio realizado por H. Wang y A. Nishimura (2000) en el que se tomaron 14 registros instrumentales de Estados Unidos y Japón, con distancias epicentrales menores a 30 km, permitió construir espectros de respuesta (Figura 2) y de diseño (Figura 3) recomendados para el diseño de vías ferroviarias.

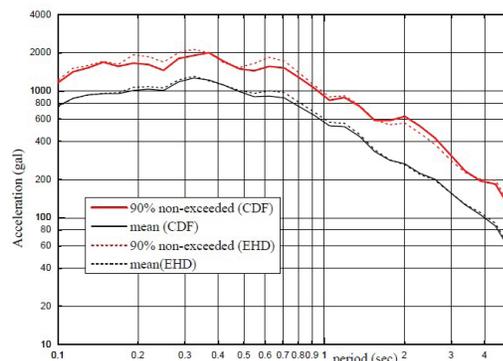


Figura 2. Espectros de respuesta en el campo cercano de registros en Estados Unidos y Japón para un 10 % de probabilidad de excedencia, tomado de Wang y Nishimura, (2000)

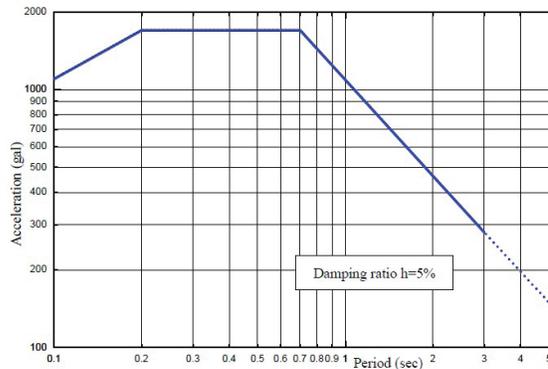


Figura 3. Espectro de diseño propuesto por Wang y Nishimura (2000) para el diseño de vías ferroviarias en Japón

En un estudio realizado por F. Moghim y M. Mehdi (2008) para estudiar el comportamiento de edificios de concreto, en la cercanía a fallas activas, permitió concluir que el espectro propuesto por UBC-97 desarrollado para determinar el espectro cerca de las fallas activas no reproducía el comportamiento observado al compararlo con el estudio de historia de desplazamientos utilizando sismos instrumentales.

Un estudio realizado por (Taheri et. al., 2010) en el cual se proponen espectros de diseño en la cercanía a fallas activas tomando en cuenta la directividad, utilizando 91 registros de sismos instrumentales, permitió obtener el espectro de diseño que se muestra en la Figura 4, conjuntamente con los espectros de diseño que se derivan al aplicar la Norma UBC-97.

Destaca que el valor máximo o la meseta se ubica en 1,9 g, superando ampliamente los valores obtenidos al aplicar la norma UBC-97.

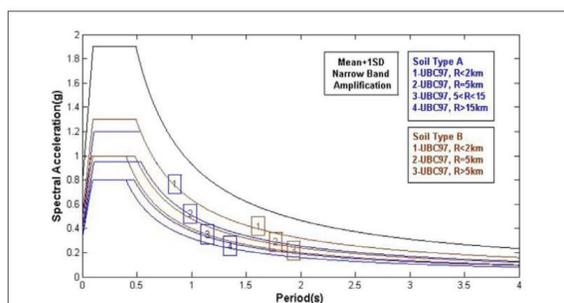


Figura 4. Espectro de diseño propuesto por Taheri et al. (2010) en la cercanía a fallas activas

En Venezuela, no existe una guía o normativa que permita construir los espectros de diseño en la cercanía a falla activas. Comúnmente, cuando no se dispone de ello, se acostumbra hacer estudios particulares de sitio, seleccionando sismos instrumentales de la red mundial, haciendo la simulación de propagación de las ondas a través del depósito de suelo.

En este estudio, utilizando una gran base de datos de la red mundial, así como el estudio de propagación de ondas a través de columnas de suelo tipificadas se desarrollaron curvas y ecuaciones que permiten obtener los valores de las ordenadas espectrales para un nivel de confianza predefinido, para sismos derivados de fallas transcurrentes de magnitudes menores o iguales a 8, aplicable a las fallas activas que existen en el país como las de Boconó, El Pilar o San Sebastián.

A nivel mundial para generar el espectro de diseño, se trabaja muchas veces con un espectro suavizado que generalmente se aproxima al valor medio más una desviación estándar, sin estar asociado a los valores de amenaza o períodos de retorno convencionales.

En este estudio, se propone trabajar con un espectro uniforme o de igual porcentaje o probabilidad de ocurrencia para diferentes periodos naturales de vibración de las estructuras.

La selección del grado de confiabilidad dependerá de la importancia de la obra y quedará a criterio del diseñador, sin embargo, basado en el estudio de H. Echezuría (2012), se ha establecido la correspondencia entre los niveles de confianza y el periodo de retorno utilizando el modelo de Poisson para una vida útil de 50 años. El presente estudio da cabida a que las nuevas normas de diseño, atendiendo a la opinión de los expertos, establezcan cuáles deberían ser los niveles de confianza, las probabilidades de excedencia, vida útil y periodo de retorno con la cual deberían ser diseñadas las estructuras esenciales.

OBJETIVO

Generar por grado de confiabilidad (90, 95 ó 98 %) espectros de diseño en la cercanía a fallas activas, considerando la distancia epicentral y los perfiles típicos de suelos, al utilizar sismos transcurrentes de magnitudes menores o iguales a 8 de la base de datos sismológicas de la red mundial y del estudio de propagación de ondas en el subsuelo.

METODOLOGÍA PARA GENERAR ESPECTROS DE DISEÑO POR GRADO DE CONFIABILIDAD ATENDIENDO A LA SISMOTECTÓNICA DEL LUGAR DE ESTUDIO

La metodología a seguir para cumplir con el objetivo propuesto en este estudio se presenta de forma detallada en la tesis titulada “Confiabilidad de los espectros de diseño elásticos sismorresistentes atendiendo a los perfiles típicos de suelos, zonificación sísmica y distancia a fallas activas” (Alviar, 2014).

En resumen, para generar las ordenadas espectrales con igual probabilidad de ocurrencia al variar el período de la estructura se requiere como entrada de datos el conocimiento de la sismotectónica del lugar de estudio, la cual vendrá representada por la ley de recurrencia. En esta se relaciona para cada una de las fuentes cual es la tasa anual de excedencia (modelo de Poisson, ecuación (1) y la magnitud de los sismos (Ver Figura 5).

$$P = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1)$$

donde:

P: probabilidad de excedencia.

λ: Tasa anual de excedencia.

t: Vida útil.

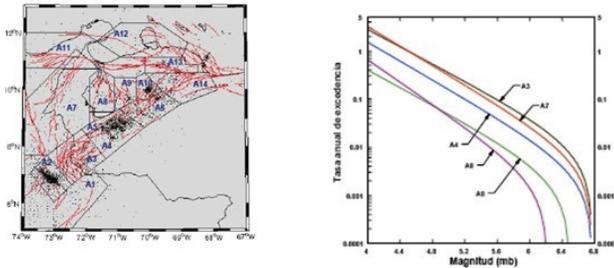


Figura 5. Ley de recurrencia. Tomado de A. Bendito, P. Rivero y W. Lobo, “Curvas de Isoaceleración para estados de desempeño estructural en el Occidente de Venezuela”, *Boletín Técnico del IMME*, Vol. 39, #2, 2001

Se requieren adicionalmente los registros de historias de aceleraciones o los espectros elásticos medidos de la red mundial con la característica de conocer con profundidad como es la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 metros del perfil, a fin de tipificar la columna de suelo atendiendo al grado de compacidad o consistencia: blanda o suelta (S), media (M) y densa o dura (D), conjuntamente con la esbeltez de la columna de suelo, como superficial (S), intermedia (I) o profunda (P), para generar 9 columnas

de suelos tipificadas como: SS, SI, SP, MS, MI, MP, DS, DI y DP.

Paso seguido, se determina la tasa anual de excedencia asociada a los sismos frecuentes, ocasionales, raros y muy raros, cuyos valores de probabilidad de excedencia y vida útil se muestran en la tabla 6. Podrían seleccionarse diferentes valores de probabilidades de excedencia y vida útil y calcular la tasa anual de excedencia utilizando el modelo de Poisson (ecuación 1).

Con la tasa anual de excedencia determinada en el paso anterior, conjuntamente con la ley de recurrencia y la fuente sismológica se determinan las magnitudes de sismos menores o iguales a ella que reproducen o satisfacen las condiciones anteriormente indicadas.

Con dicho valor de magnitud de sismo conocido (M) y perfil de suelo tipificado como se explicó anteriormente, se tomaría de la base de datos de la red mundial los espectros medidos en superficie que cumplen con la condición de magnitudes menores o iguales a M y las columnas de suelos de las bases de datos que tipifican con la columna de suelo donde se está realizando el estudio correspondiente.

De allí se obtendría la gráfica que relaciona las aceleraciones espectrales con las distancias epicentrales para los sismos de magnitud menores o iguales a M y columna de suelo tipificada.

Con los valores de aceleración y distancias epicentrales se definirían las curvas con igual probabilidad de ocurrencia utilizando un modelo estadístico del tipo LOGNORMAL, para percentiles prefijados por el experto. Particularmente en este estudio se han calculado para niveles de confianza de 90, 95 y 98 % y sismos transcurrentes con magnitudes menores o iguales a 8.

La incertidumbre en la distancia epicentral para predecir la aceleración espectral, una vez fijada la tasa anual de excedencia asociada a un grupo de sismos menores o iguales M, se ve cuantificada cuando se calcula desde el punto de vista estadístico los niveles de confianza prefijados.

Atendiendo al estudio realizado por H. Echezuría (2012) en el que se relacionan los valores de las ordenadas espectrales con el periodo de retorno al utilizar un modelo de Poisson, permite inferir que los valores de confiabilidad obtenidos en el presente estudio de 90, 95 y 98 % se corresponden con probabilidades de excedencia de 10, 5 y 2 %, con periodos de retorno de 475, 975 y 2.475 años respectivamente, para una vida útil de 50 años, valores que se derivan de la

ecuación (1) previamente indicada.

Las curvas por grado de confiabilidad serían ajustadas a ecuaciones del tipo:

$$a = C_1 * e^{C_2 * X} \quad (2)$$

donde:

a = aceleración espectral (g)

C₁ y C₂: Coeficientes de ajuste.

X: distancia epicentral (km)

Para obtener los coeficientes C₁ y C₂ correspondientes al período cero (caso de aceleración en superficie).

El proceso anterior se repetiría para cada uno de los períodos de la data sismológica para definir nuevos coeficientes C₁ y C₂ por nivel de confianza, período natural de vibración de la estructura y tipología o columna de suelo.

La metodología anteriormente explicada podrá aplicarse en cualquier lugar del planeta atendiendo a la sismotectónica propia del lugar bajo estudio, siempre que se cuente con la base de datos sismológico de la red mundial y se conozca la tipología de la columna de suelo.

La aplicación del método propuesto permite realizar el estudio del comportamiento por desempeño de estructuras que son sometidas a sismos con variada probabilidad de excedencia y grado de confiabilidad prefijado, con miras a definir cuáles serían las técnicas de rehabilitación o reforzamiento que pudiesen implementarse a fin de garantizar un desempeño adecuado en términos de operatividad, ocupación, daños estructurales y evitar su colapso.

METODOLOGÍA APLICADA AL CASO DE FALLAS ACTIVAS TRANSCURRENTES

Con la metodología previamente explicada se han construido las Figuras 6 a 14 que se anexan, las cuales relacionan las aceleraciones espectrales con la distancia epicentral para sismos transcurrentes de magnitudes menores o iguales a 8. Definiéndose líneas con igual probabilidad de ocurrencia 90, 95 ó 98 % a las cuales corresponden periodos de retorno de 475, 975 y 2.475 años respectivamente en estructuras con 50 años de vida útil.

Se han definido nueve (9) columnas típicas de suelos utilizando la siguiente convención:

- SS: Suelo suelto o blando superficial.
- SI: Suelo suelto o blando de espesor intermedio.
- SP: Suelo suelto o blando profundo.
- MS: Suelo medio superficial.
- MI: Suelo medio intermedio.
- MP: Suelo medio profundo.
- DS: Suelo denso o duro superficial.
- DI: Suelo denso o duro intermedio.
- DP: Suelo denso o duro profundo.

La primera letra está asociada a la compacidad o consistencia: suelta o blanda (S) con velocidad de ondas de corte < 185 m/s, media (M) con velocidad de ondas de corte comprendidas entre 185 y 250 m/s y densa o dura (D) con velocidad de ondas de corte > 250 m/s.

La segunda letra está asociada al espesor del depósito: superficial (S) menor o igual a 5 metros, de espesor intermedio (I) entre 5 y 30 metros y de espesor profundo (P), mayor de 30 metros.

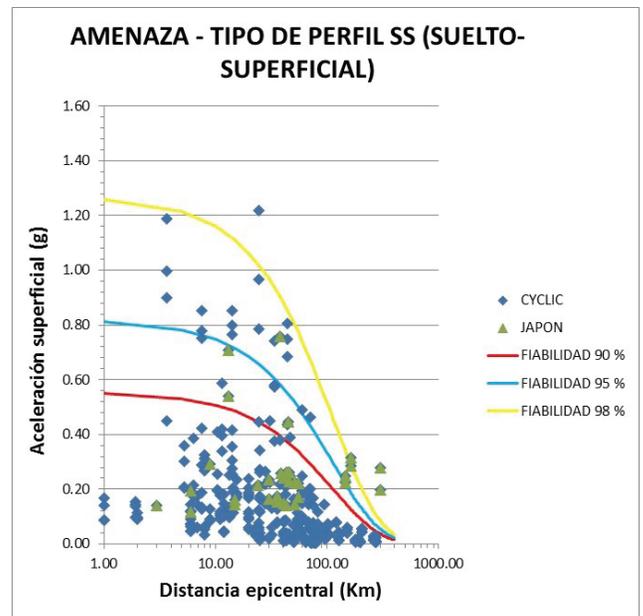


Figura 6. Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo SS (suelto o blando superficial). Fuente propia

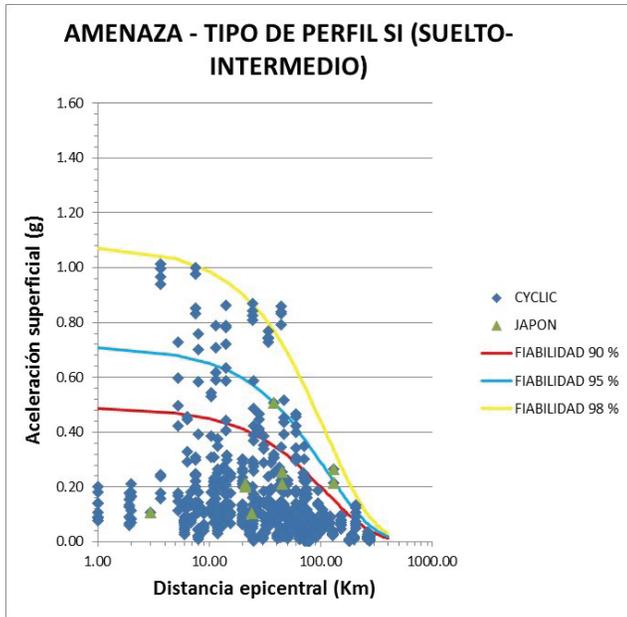


Figura 7. Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo SI (suelto o blando de espesor intermedio). Fuente propia

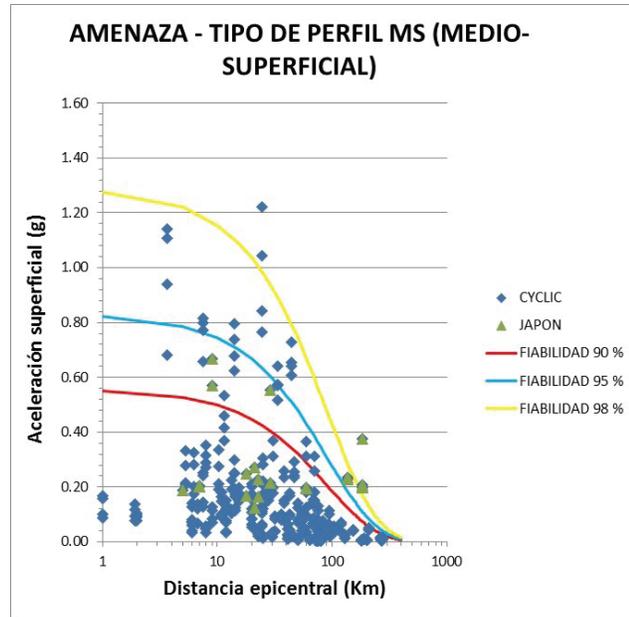


Figura 9. Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo MS (de consistencia media-superficial). Fuente propia

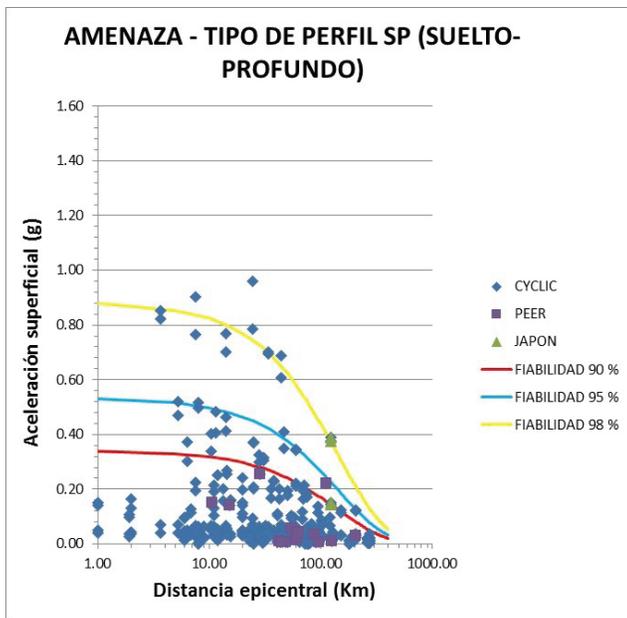


Figura 8. Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo SP (suelto o blando profundo). Fuente propia

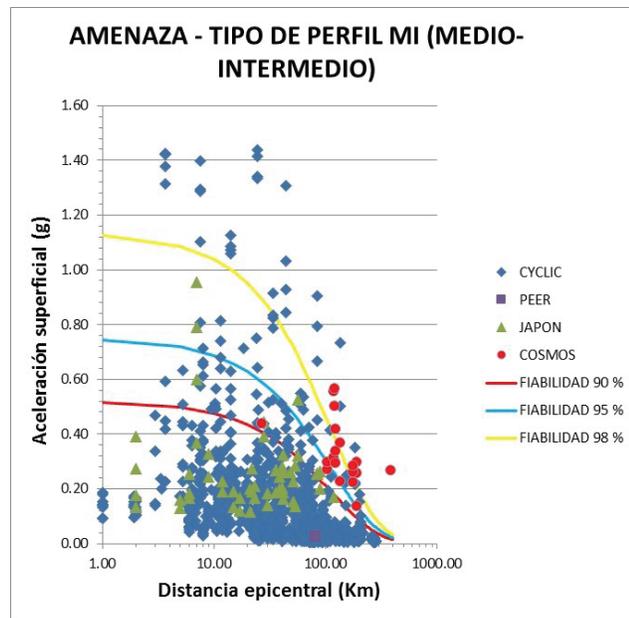


Figura 10. Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo MI (de consistencia media y espesor intermedio). Fuente propia

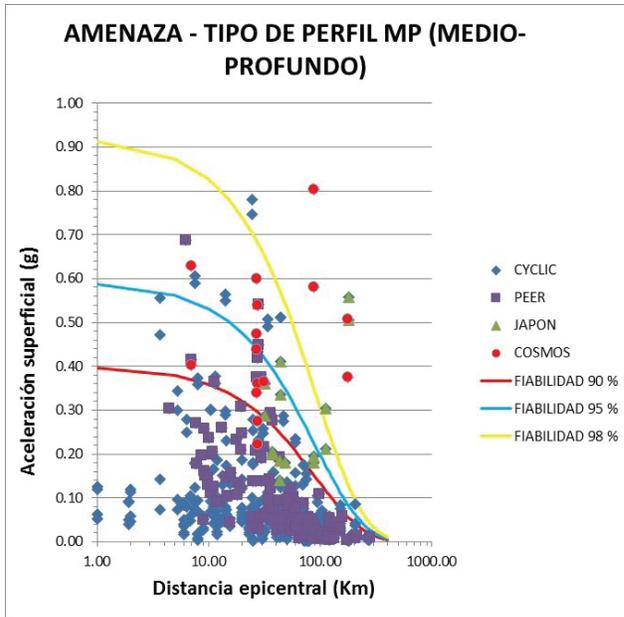


Figura 11. Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo MP (de consistencia media-profunda). Fuente propia

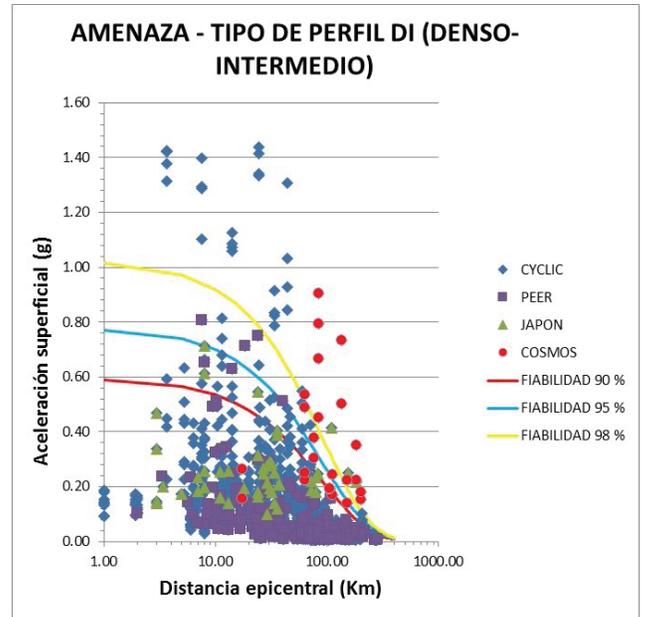


Figura 13. Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo DI (de consistencia dura o densa de espesor intermedio). Fuente propia

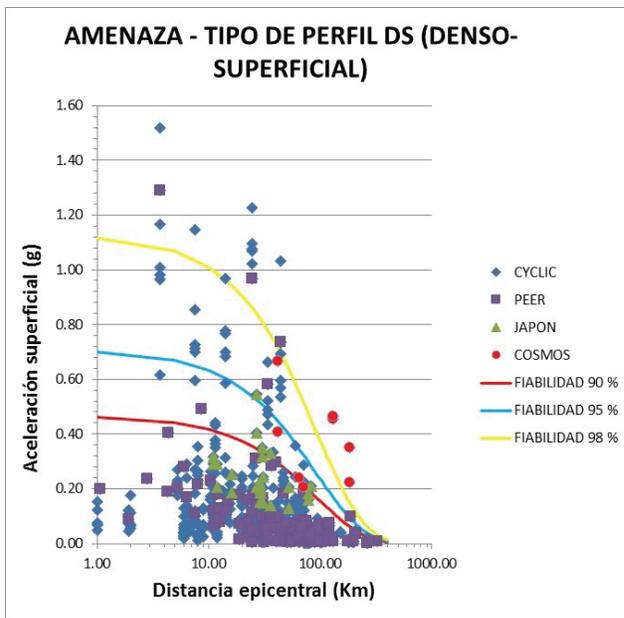


Figura 12. Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo DS (de consistencia dura o densa superficial). Fuente propia

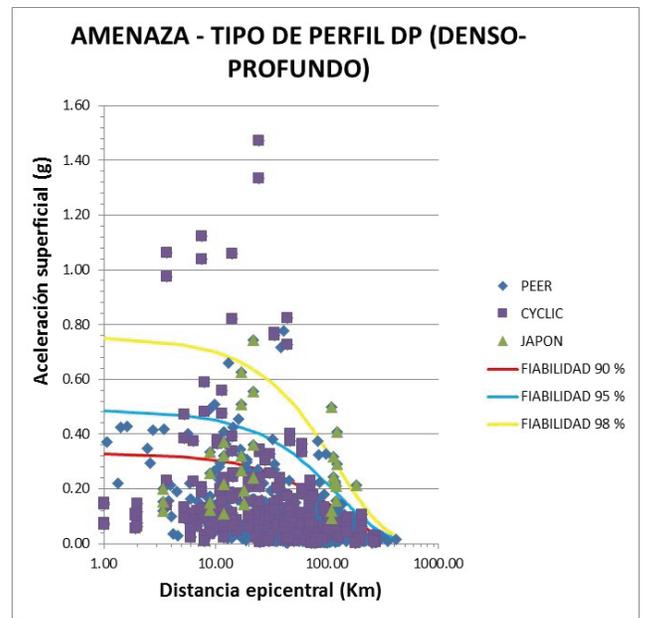


Figura 14. Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo DP (de consistencia dura o densa profunda). Fuente propia

Con el perfil caracterizado y conocida la distancia de la estructura por diseñar a la falla activa (distancia epicentral, para un nivel de confianza seleccionado) se obtienen los valores de aceleraciones espectrales por periodo natural de vibración utilizando los coeficientes de ajuste C_1 y C_2 que se incluyen en el anexo A1 a A9.

Se incluye particularmente en este estudio la comparación entre las leyes de atenuación obtenidas por diferentes autores en la que se relacionan la aceleración espectral, la distancia epicentral y la magnitud de sismo medido en estratos rocosos y el derivado en este estudio para el perfil de suelo Denso-Superficial y magnitudes de sismos menores o iguales a 8.

Ejemplos de los espectros que se obtendrían aplicando esta metodología han sido reproducidos en las Figuras 17 a 24 para los casos de fallas activas como las de San Sebastián, Boconó y el Pilar, incluyéndose para efectos de comparación los espectros que se obtendrían al aplicar la Norma Covenin venezolana 1756-01.

LEYES DE ATENUACIÓN VS. ACELERACIONES ESPECTRALES POR GRADO DE CONFIANZA PARA DEPÓSITOS DE SUELOS DENSO-SUPERFICIALES

Con el objeto de comparar algunas leyes de atenuación que existen en la literatura y los valores de aceleraciones espectrales por grado de confianza derivado del presente estudio para los depósitos de suelos clasificados como Denso-Superficiales, se ha elaborado la Figura 15.

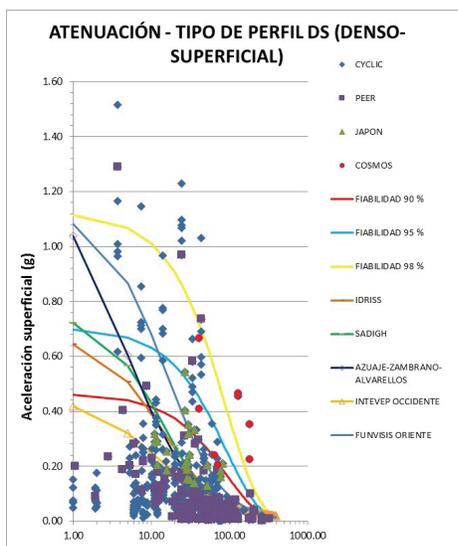


Figura 15. Algunas de las leyes de atenuación propuestas en la literatura y los niveles de confianza para el perfil de suelo identificado como DS (Denso-Superficial). Fuente propia

En la Figura 15 se han incluido leyes de atenuación para roca o suelos duros o densos para una magnitud de sismo de 7,5 utilizando su valor medio, sin incluir la desviación estándar.

De la fig. 15 se destacan los siguientes aspectos:

- Existe gran dispersión en los valores de aceleración predichos por las diferentes leyes de atenuación en el campo cercano a distancias comprendidas entre 1 y 20 km.
- En el campo lejano, mayor a 20 km, los valores de aceleración presentan menor dispersión.
- En el campo cercano, las leyes de atenuación propuestas por Funvisis Oriente y la tesis de Azuaje, Zambrano y Alvarellos están comprendidas entre las curvas o niveles de confianza de 95% a 98 % obtenidas en el presente estudio, aun cuando solamente se han representado los valores medios.
- En el campo cercano las leyes de atenuación propuestas por Idriss y Sadigh están comprendidas entre las curvas o niveles de confianza de 90% a 95 % obtenidas en el presente estudio.
- En el caso de Intevep Occidente, la ley de atenuación está ubicada por debajo del 90 % del nivel de confianza, considerando que esta ley de atenuación, al igual que en las anteriores, se han representado los valores medios de aceleración.
- En caso de incluir las desviaciones estándares en las leyes de atenuación anteriores los valores de aceleración se verían incrementados.
- Las comparaciones anteriores con las leyes de atenuación propuestas por diferentes autores y los niveles de confianza indicados en este estudio permiten concluir que los valores de aceleración que se obtendrían relacionando los niveles de confianza derivados del presente estudio y las distancias epicentrales se ubican en el rango de valores de aceleración esperados y propuestos por varios autores o fuentes, aplicable para la generación de espectros en la cercanía a fallas activas.

ESPECTROS DE DISEÑO POR CONFIABILIDAD A CIERTA DISTANCIA DE UNA FALLA ACTIVA UTILIZANDO SISMOS TRANSCURRENTES DE MAGNITUDES MENORES O IGUALES A 8

En el caso de que se requiera generar espectros de diseño por grado de confiabilidad a cierta distancia de una falla o en la cercanía de fallas activas, el primer paso es clasificar cuál de los nueve tipos de perfiles se corresponde con la zona en estudio.

Una vez conocido el tipo de perfil se mide qué distancia en km existe entre la falla activa y el lugar objeto de estudio.

Con la distancia conocida y seleccionado un valor de confiabilidad (90 %, 95 % o 98 %) o periodos de retorno de 475, 975 o 2475 años respectivamente para una vida útil de 50 años, se calcularían los valores de las ordenadas espectrales utilizando los coeficientes C_1 y C_2 que se indican en el Anexo A1 a A9, conjuntamente con la ecuación (2).

A título de ejemplo, se desea generar para la ciudad de Caracas, cuál sería el espectro de diseño que se reproduciría con un grado de confiabilidad de 90 % debido a un sismo cuyo epicentro está a una distancia de 20 km, si el perfil de suelo es denso y la roca se ubica a 30 metros de profundidad. (Por ejemplo la falla de San Sebastián identificada como VE-16 en la Figura 16).

De acuerdo con la información anterior el perfil de suelo se clasifica como DI (Denso y de espesor intermedio). El espectro que resultaría se muestra en la Figura 17.

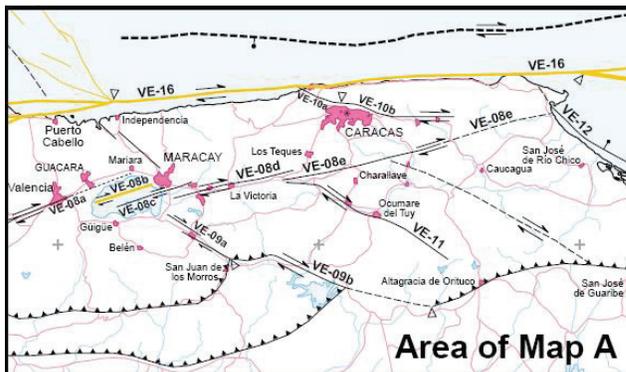


Figura 16. Mapa de fallas activas en la Región Central de Venezuela. Tomado de Audemard, F. A.; Machette, M.; Cox, J.; Dart, R.; Haller K. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions*. U.S. Geological Survey, Open File Report 00-018 (paper edition)

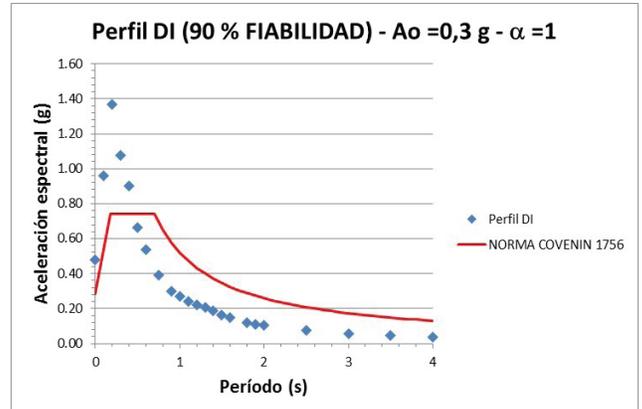


Figura 17. Espectro de diseño para un sitio ubicado a 20 km de una falla activa con nivel de confianza de 90 % en un perfil de suelo Denso-Intermedio (DI). Fuente propia

Destaca que para el rango de bajos períodos los valores de aceleración espectral son mayores a los indicados en la Norma Covenin 1756-01, esto se corresponde con el caso de viviendas que poseen de 1 a 4 niveles. Para el rango de períodos mayores a 0,5 s las aceleraciones espectrales son menores a los de la norma, lo cual implica que podrían ajustarse o disminuirse los efectos sísmicos para este nivel de confianza.

Si la estructura fuese clasificada como esencial, con factor de importancia de 1,3 y asumiendo un nivel de confianza de 95 % para su diseño, se obtendría el espectro de respuesta que se muestra en la Figura 18.

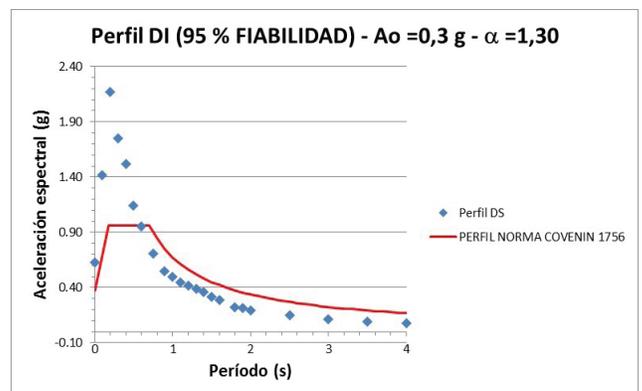


Figura 18. Espectro de diseño para un sitio ubicado a 20 km de una falla activa con nivel de confianza de 95 % en un perfil de suelo Denso-Intermedio (DI). Fuente propia

Un comportamiento similar al caso anteriormente comentado se obtiene en el rango de bajos períodos, con niveles más altos de aceleración espectral con respecto a la norma al considerar el efecto de cercanía a fallas activas.

Considerando que el sitio de estudio se encuentra a 5 km de la falla activa, por ejemplo el caso de la ciudad de Cumaná y la falla de El Pilar, Figura 19, los resultados que se obtendrían para un nivel de confianza de 90 % y 95 % se muestran en las Figuras 20 y 21 respectivamente.

Otro caso es el de un hospital ubicado en una zona cercana a una falla (5 km), por ejemplo, de la ciudad de Barquisimeto a la falla de Boconó, Figura 22, los espectros que se obtendrían para un 90 % y un 95 % de confiabilidad se muestran en las Figuras 23 y 24 respectivamente.

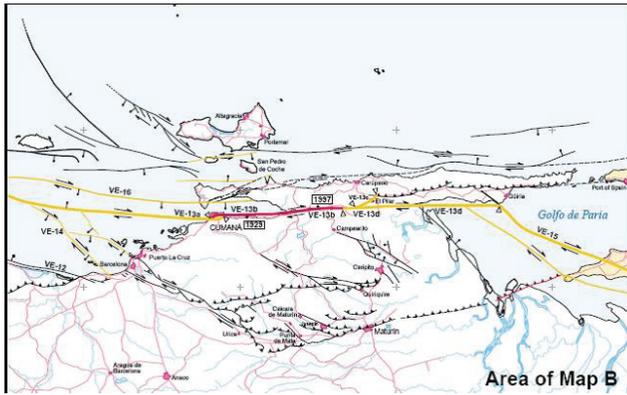


Figura 19. Fallas activas en el oriente de Venezuela. Tomado de Audemard, F. A.; Machette, M.; Cox, J.; Dart, R.; Haller K. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions*. U.S. Geological Survey, Open File Report 00-018 (paper edition)

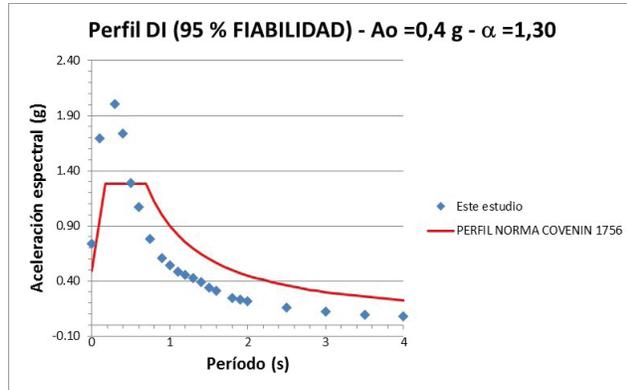


Figura 21. Espectro de diseño para un sitio ubicado a 5 km de una falla activa con nivel de confianza de 95 % en un perfil de suelo Denso-Intermedio (DI). Fuente propia

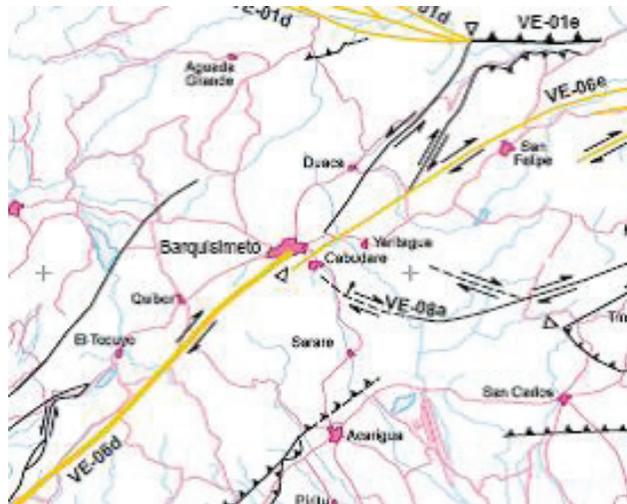


Figura 22. Fallas activas en el estado Lara. Tomado de Audemard, F. A.; Machette, M.; Cox, J.; Dart, R.; Haller K. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions*. U.S. Geological Survey, Open File Report 00-018 (paper edition)

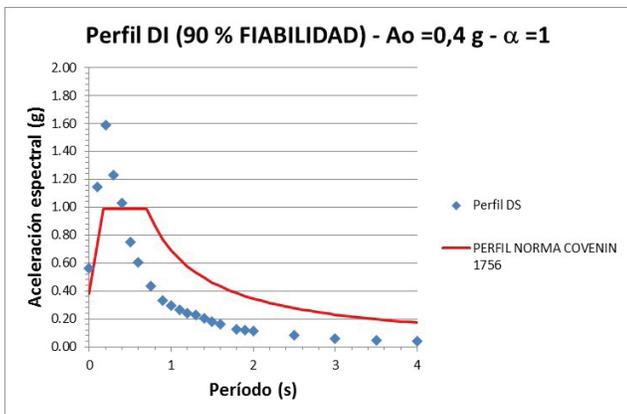


Figura 20. Espectro de diseño para un sitio ubicado a 5 km de una falla activa con nivel de confianza de 90 % en un perfil de suelo Denso-Intermedio (DI). Fuente propia

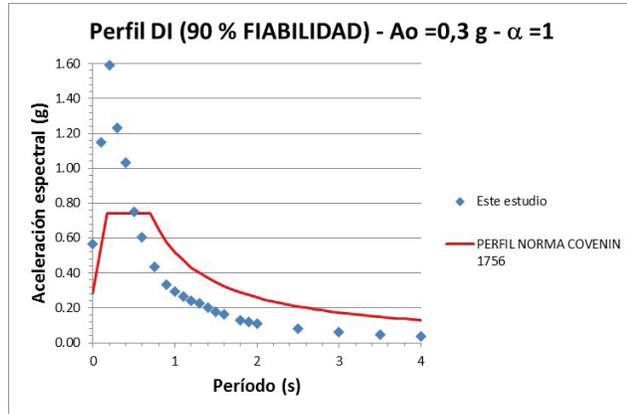


Figura 23. Espectro de diseño para un sitio ubicado a 5 km de una falla activa con nivel de confianza de 90 % en un perfil de suelo Denso-Intermedio (DI). Fuente propia

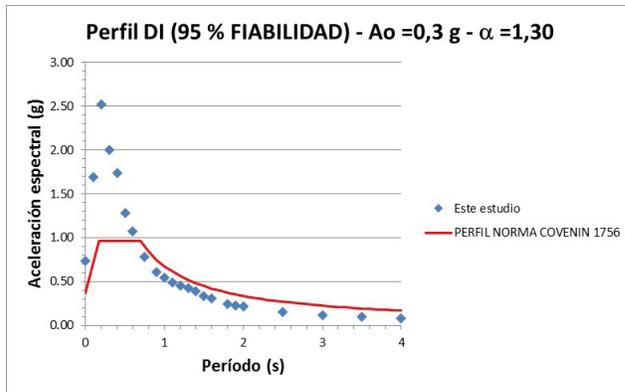


Figura 24. Espectro de diseño para un sitio ubicado a 5 km de una falla activa con nivel de confianza de 95 % en un perfil de suelo Denso-Intermedio (DI). Fuente propia

Los resultados anteriores indican que en general, en este estudio, se obtienen valores de ordenadas espectrales mayores a los indicados en la Norma 1756-01 en el rango de bajos períodos (menor a 0,6 s), en la cercanía de fallas activas, lo cual se corresponde con estructuras con número de pisos comprendidos entre 1 y 6 pisos, como se muestran en la Figura 25, al utilizar las ecuaciones indicadas en la norma para estimar el período fundamental de estructuras en función de su altura y tipo.

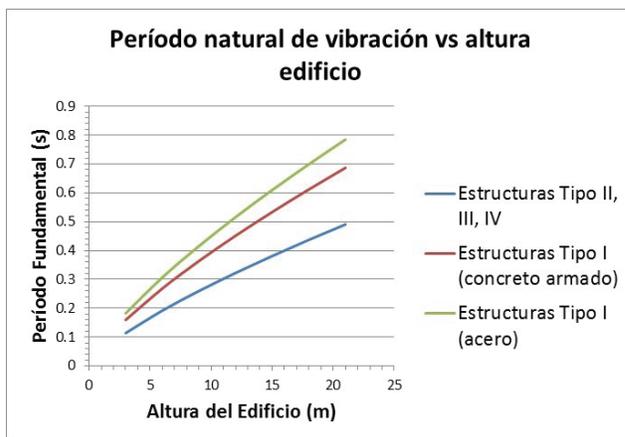


Figura 25. Período natural de vibración vs altura del edificio. Fuente propia

Los resultados obtenidos sugieren hacer ajustes en los espectros de diseño, a fin de considerar valores más altos en las aceleraciones espectrales en el rango de bajos períodos de vibración o considerar incorporar en la norma nuevos espectros de diseño en la cercanía de fallas activas.

La aplicación del método propuesto permite obtener los espectros de diseño para estructuras esenciales que se ubican en la cercanía a fallas activas, donde es primordial

cuantificar de manera más confiable cuales son los valores de aceleraciones espectrales esperadas, a diferencia de usar un código de diseño que tiende a suavizar los valores de aceleraciones espectrales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se ha desarrollado una metodología que permite obtener espectros de diseño con igual probabilidad de ocurrencia de estructuras ubicadas en la cercanía a fallas activas. Particularmente en este estudio se han seleccionado sismos transcurrentes con magnitudes menores o iguales a 8 que son representativos de fallas importantes como las de San Sebastián, Boconó o El Pilar en Venezuela. Ello permitiría determinar cuáles son los espectros de diseño de estructuras esenciales como hospitales, estaciones de bomberos, puentes, escuelas, etc. ubicadas a pocos kilómetros de fallas activas.
- La metodología consiste en representar gráficamente la relación entre las aceleraciones espectrales y distancias epicentrales por períodos y tipología de columna de suelo, asociadas a sismos de magnitudes menores o iguales a M, valor que se obtendría de la sismotectónica propia del lugar (ley de recurrencia). Paso seguido se definen líneas con igual probabilidad de ocurrencia utilizando una distribución lognormal y se determinan los coeficientes de ajuste C_1 y C_2 en una ecuación del tipo exponencial ($a = C_1 * e^{C_2 * X}$), la cual permitiría obtener los valores de las ordenadas espectrales (a).
- Las líneas con igual probabilidad de ocurrencia de 90, 95 y 98 % obtenidas en el presente estudio están relacionadas con periodos de retorno de 475, 975 y 2.475 años respectivamente en estructuras con vida útil de 50 años.
- La diferencia entre las ordenadas espectrales normativas y las obtenidas en este estudio en el rango de bajos períodos tiende a aumentar con el nivel de confianza o probabilidad de excedencia y a menor distancia de las fallas activas.
- Este estudio contribuye en la generación de espectros de respuesta por nivel de confianza en la cercanía de fallas activas, atendiendo al perfil de suelo y distancia epicentral.
- Se han generado coeficientes y ajustes de curvas por tipo de perfil y espesor, así como distancia epicentral, a fin de incorporar en una hoja de cálculo los espectros que se obtendrían por nivel de confianza a fin de hacer comparaciones con la normativa existente y hacer los ajustes que sean relevantes, además de proponer una nueva metodología y nuevos espectros de diseño.

- Se ha derivado en este estudio, por perfil de suelo, leyes de atenuación por grado de confiabilidad 90 %, 95 % y 98 %. A diferencia de las leyes de atenuación que comúnmente se hacen en las que se trazan líneas de atenuación dependiendo de la magnitud sísmica, en este estudio se han utilizado las aceleraciones obtenidas con las distancias para sismos de magnitudes menores o iguales a 8. Se trata en este caso de representar como serían los espectros de diseño que podrían generarse si estamos en presencia de una falla activa de gran relevancia y que en cualquier momento puede generarse un sismo de tal magnitud. La metodología podría circunscribirse a un nivel de magnitudes de sismos en función de la tasa anual de excedencia y fuente sísmica (ley de recurrencia).
- Se recomienda ampliar la base de datos sísmicos con variada intensidad, duración y frecuencia, así como, sismos lejanos y cercanos, etc., además de recurrir a la opinión de expertos a la hora de establecer espectros normativos para ser incluidos en un código de diseño.
- Una limitación en la metodología presentada es que en las ordenadas espectrales no se aprecia el efecto de amplificación en la cercanía a los 2 segundos correspondiente a los suelos problemáticos detectados en el valle de Caracas o Ciudad de México. Ello implica que debe alimentarse el modelo con casos provenientes de sismos instrumentales o producto de la simulación de ondas asociados a este tipo de columnas de suelos. Para ello, es importante contar con la información de la distribución de la velocidad de ondas de corte con profundidad y la apropiada caracterización dinámica del suelo que permita reproducir el comportamiento observado, además de colocar estaciones sismológicas en este tipo de suelos y contar con sus respectivos registros instrumentales.
- Los resultados aquí obtenidos servirán como guía a la hora de definir con igual probabilidad de ocurrencia los valores de las ordenadas espectrales de los espectros de diseño, con miras a que pueda ser incorporado en los códigos de diseño, previa consulta de la opinión de expertos de cual podría ser el nivel de confianza al cual deberían diseñarse las estructuras esenciales en la cercanía a fallas activas.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ronald Torres, tutor de la tesis doctoral, por darme a conocer parte de sus conocimientos en el curso de Problemas Especiales aplicando métodos para evaluar la confiabilidad de estructuras y orientarme acertadamente en la realización de la tesis.

Al Dr. Ender Parra por darme a conocer la herramienta de cálculo Cyclic 1-D y a las organizaciones ubicadas en California, Pacific Earthquake Engineering Center (PEER y COSMOS) y en Japón, NIED, National Research Institute of Earth Science and Disaster Prevention, por permitirme el acceso a la base de datos sismológicos, sin las cuales no hubiese sido posible la realización del presente trabajo de investigación.

Al MSc. Heriberto Echezuría quien conoce ampliamente del tema, y fue tutor de la tesis de pregrado, de la conversación que tuvimos surgió el enfoque de obtener las ordenadas espectrales en términos de niveles de confianza.

REFERENCIAS

- ABRAHAMSON, N.A. Y SILVA W. (1995). A consistent set of ground motion attenuation relations including data from the 1994 Northridge earthquake, abstract. *Seismological Research Letters*, 66(2), 23
- AGUIAR, R.(2004). “Espectros sísmicos de riesgo uniforme para verificar desempeño estructural en países sudamericanos”, *Boletín Técnico del IMME*, Vol. 42, #1
- ALVIAR, J. (2003) “Propuesta de espectros de diseño sísmico en arenas sueltas licuables utilizando el algoritmo de cálculo Cyclic 1-D”, Trabajo de ascenso para ascender a la categoría de asociado. Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio, Caracas
- ALVIAR, J. (2014) “Confiabilidad de los espectros de diseño elásticos sismorresistentes atendiendo a los perfiles típicos de suelos, zonificación sísmica y distancia a fallas activas”, Tesis doctoral para optar al título de doctor en Ingeniería Estructural en la Universidad Central de Venezuela
- ATC-40, Applied Technology Council “Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings”, Vol. 1, California Seismic Safety Commission, Report SSC-96-01
- AUDEMARD, F. A.; MACHETTE, M.; COX, J.; DART, R.; HALLER K. (2000). Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions. U.S. Geological Survey, Open File Report 00-018
- AZUAJE, J, ZAMBRANO, H Y ALVARELLOS J. (2005). Generación de relaciones empíricas de atenuación del movimiento del suelo para la provincia sísmica nororiental de Venezuela, Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil en la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional

- BENDITO, A., RIVERO P. Y LOBO, W. (2001). Curvas de Isoaceleración para estados de desempeño estructural en el Occidente de Venezuela, Boletín Técnico del IMME, Vol. 39, #2,.
- BOORE, D. M.; JOYNER, W.B. Y FUMAL T. (1993) Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American earthquakes: an interim report. U.S. Geological Survey, Open File Report 93-509
- BOORE, D.M. AND ATKINSON, G.M. (2007). Boore-Atkinson NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley, PEER.
- BOZORGNIA, Y. Y CAMPBELL, K. (2004) Engineering Characterization of Ground Motion, Cap. 5, Earthquake Engineering, Y. Bozorgnia and V. Bertero, CRC PRESS LLC, USA,.
- CAMPBELL, K.W. & BOZORGNIA, Y. (1997). Update Near-Source Ground-Motion (Attenuation) Relations for the Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceleration Response Spectra. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93(1): 314-331
- CAMPBELL, K.W AND BOZORGNIA, Y. CAMPBELL-BOZORGNIA NGA. (2007). Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley.
- CHOPRA, A. (1995). Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, USA.
- ECHENZURÍA, H. (1997). “Efectos de Sitio”, diseño sismorresistente, especificaciones y criterios empleados en Venezuela, Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Tema 7, 91-110, Caracas
- ECHENZURÍA, H. (2012). Análisis estadístico de las colas de las distribuciones de probabilidades de las ordenadas espectrales para la preparación de espectros elásticos con diferentes periodos de retorno, XX Seminario Venezolano de Geotecnia, Caracas
- ELGAMAL, A., YANG Z. Y PARRA, E. (2002). Computational Modeling of Cyclic mobility and Post-Liquefaction Site Response, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, pp. 259-271, Elsevier .
- ELGAMAL, A. ET. AL. (2005). Dynamic response of saturated dense sand in laminated centrifuge container. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA-356, Washington, D.C.
- FUNVISIS – Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, <http://www.funvisis.gob.ve/amenaza.php>, consulta González, G. & Fajardo, J. (2010). Espectros de respuesta en suelos problemáticos (Arenas potencialmente licuables y Arcillas que degradan su resistencia o rigidez, Trabajo de grado para optar al título de Técnico Superior Universitario en Construcción Civil, Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio, Caracas.
- GRASES, J. (2002) Introducción a la evaluación de la amenaza sísmica en Venezuela acciones de mitigación, Fundación Pedro Grases, Caracas
- IDRISS, I.M. (2007). Empirical model for estimating the average horizontal values of pseudo-absolute spectral accelerations generated by crustal earthquakes, USGS Report.
- KRAMER, S. (2004). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, USA, 1996.
- LAI T, ELGAMAL A, YANG Z, WILSON D.W., KUTTER B.L. Numerical modeling of dynamic centrifuge experiments on a saturated dense sand stratum. 11 Int. Conference on soil Dynamics & Earthquake Engineering, University of California, Berkeley.
- MOGHIM, F. AND MEHDI, M. (2008). The applicability of Direct Displacement-Based Design in designing concrete buildings located in near-fault regions, The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, Beijing, China, http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_05-03-0013.PDF

- MOHRAZ, B., HALL, W. J., AND NEWMARK, N. M. (1972). A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra, Nathan M. Newmark Consulting Engineering Services, Urbana, Illinois, AEC Report WASH-1255.
- MOHRAZ, B. Y SADEK, F. (2000). Earthquake Ground Motion and Response Spectra, the Seismic Design Handbook, 2nd edition, CD-ROM
- MONTES DE OCA, V. (2011). Validación de los espectros indicados en la Norma Venezolana Covenin 1756-1:2001 a partir de la base de datos PEER (Pacific Earthquake engineering research Center) y del estudio de la propagación de ondas sísmicas en diversas columnas de suelos, Trabajo de grado para optar al título de Técnico Superior Universitario en Construcción Civil, Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio
- NORMA COVENIN 1756-01, Edificaciones sismorresistentes, Fondonorma, Funvisis, Caracas, 2001
- PARRA, E. (1996). Numerical Modeling of Liquefaction and Lateral Ground Deformation Including Cyclic Mobility and Dilation Response in Soil Systems, Ph.-D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York
- QUIJADA, P. GAJARDO, E.; FRANKE, M.; KOZUCH, M; GRASES, J. (1993). Análisis de amenaza sísmica de Venezuela para el nuevo mapa de zonificación con fines de ingeniería. En Memorias del VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismorresistente y Primeras Jornadas Andinas de Ingeniería Estructural 1993. Mérida, Venezuela; S-92 – S-101
- RIVERO, P. Y LOBO, W. (1996). Formas espectrales para suelos considerando comportamiento no-lineal, Boletín técnico IMME, Vol. 34, No. 3, Caracas, Venezuela, Sadigh, K.; Chang, C. -Y.; Egan, J. A.; Makdisi, F.; Youngs, R.R. (1997). Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data. Seismological Research. Letters, 68(1)
- SCHNABEL, P. B., LYSMER, J. Y SEED, H. B. (1972). SHAKE 2: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, Nacional Science Foundation.
- SEED, H. B., UGAS, C., AND LYSMER, J. (1976) Site-Dependent Spectra for Earthquake Resistance Design, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 66, No. 1, 221-243
- SEED B., WONG R., IDRIS I. Y TOKIMATSU K. (1984). Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-84/14, California, Berkeley.
- Software Cyclic 1-D. A. Elgamal A., Yang Z., Parra E. and Ragheb A. (2013)
- Software Easyfit Professional 5.4, Mathwave Technologies, (2010)
- Software STATGRAPHICS PLUS 5.1, Statistical Graphics Corp., 2001.
- SOMERVILLE, P. (2003). Magnitude Scaling of the Near Fault Rupture Directivity Pulse, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 137:201-202, , https://www.researchgate.net/publication/223229959_Magnitude_Scaling_of_the_Near_Fault_Rupture_Directivity_Pulse_Physics_of_the_Earth_and_Planetary_Interiors_137201-202.
- STEWART, Y, SEYHAN E. (2013). Semi-empirical Nonlinear Site Amplification and its application on NEHPR site factors. Pacific Earthquake Engineering Research Center, November.
- TAHERI, H ET. AL. Proposed design spectra for near-fault regions using forward directivity records, International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment, Vol. 1, Iss 3, pp.334-343, 2010. <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/17595901011080913>
- TORRES, R. (2005), Apuntes de clase de la materia Problemas Especiales: Fiabilidad Estructural, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Estudios de Postgrado.
- UGAS, C. (1974) Espectros para diseño antisísmico en función de las condiciones locales del suelo, Boletín técnico IMME, Vol. 48, Caracas, Venezuela.
- UNIFORM BUILDING CODE (1997), Structural Engineering Design Provisions, International Code Council, Vol. 2, Feb 1, 1997, California, US .
- USGS. (2008). Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps, open file report 2008-1128. U.S. Department of the interior, U.S. Geological Survey. Virginia.

- VASILEIOS, A.D., NOKOS, G., GAZETAS, G. (2012). Constitutive model for soil amplification of ground shaking parameter calibration, comparisons, validation, Elsevier, July 15.
- WANG, X. y NISHIMURA, A. (2000). On seismic motion near active faults base on seismic records, Proceedings of the twelfth world conference on earthquake engineering Auckland, New Zealand. <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0853.pdf>.

ANEXOS

Tabla 1. Coeficiente Sísmico Ca

SOIL PROFILE TYPE	SEISMIC ZONE FACTOR, Z				
	Z = 0.076	Z = 0.16	Z = 0.2	Z = 0.3	Z = 0.4
S _A	0.06	0.12	0.16	0.24	0.32N _G
S _B	0.08	0.15	0.20	0.30	0.40N _G
S _C	0.09	0.18	0.24	0.33	0.40N _G
S _D	0.12	0.22	0.28	0.36	0.44N _G
S _E	0.19	0.30	0.34	0.36	0.36N _G
S _F	See Footnote 1				

¹Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for Soil Profile Type S_F.

Tabla 2. Coeficiente Sísmico Cv

SOIL PROFILE TYPE	SEISMIC ZONE FACTOR, Z				
	Z = 0.076	Z = 0.16	Z = 0.2	Z = 0.3	Z = 0.4
S _A	0.06	0.12	0.16	0.24	0.32N _v
S _B	0.08	0.15	0.20	0.30	0.40N _v
S _C	0.13	0.25	0.32	0.45	0.56N _v
S _D	0.18	0.32	0.40	0.54	0.64N _v
S _E	0.26	0.50	0.64	0.84	0.96N _v
S _F	See Footnote 1				

¹Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for Soil Profile Type S_F.

Tabla 3. Coeficiente Sísmico Na

SEISMIC SOURCE TYPE	CLOSEST DISTANCE TO KNOWN SEISMIC SOURCE ^{1,3}		
	≤ 2 km	6 km	≥ 10 km
A	1.5	1.2	1.0
B	1.3	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0

¹The Near-Source Factor may be based on the linear interpolation of values for distances other than those shown in the table.

²The location and type of seismic sources to be used for design shall be established based on approved geotechnical data (e.g., most recent mapping of active faults by the United States Geological Survey or the California Division of Mines and Geology).

³The closest distance to seismic source shall be taken as the minimum distance between the site and the area described by the vertical projection of the source on the surface (i.e., surface projection of fault plane). The surface projection need not include portions of the source at depths of 10 km or greater. The largest value of the Near-Source Factor considering all sources shall be used for design.

Tabla 4. Coeficiente Sísmico Nv

SEISMIC SOURCE TYPE	CLOSEST DISTANCE TO KNOWN SEISMIC SOURCE ^{1,3}			
	≤ 2 km	6 km	10 km	≥ 16 km
A	2.0	1.6	1.2	1.0
B	1.6	1.2	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0

¹The Near-Source Factor may be based on the linear interpolation of values for distances other than those shown in the table.

²The location and type of seismic sources to be used for design shall be established based on approved geotechnical data (e.g., most recent mapping of active faults by the United States Geological Survey or the California Division of Mines and Geology).

³The closest distance to seismic source shall be taken as the minimum distance between the site and the area described by the vertical projection of the source on the surface (i.e., surface projection of fault plane). The surface projection need not include portions of the source at depths of 10 km or greater. The largest value of the Near-Source Factor considering all sources shall be used for design.

Tabla 5. Selección de la Fuente Sísmica

SEISMIC SOURCE TYPE	SEISMIC SOURCE DESCRIPTION	SEISMIC SOURCE DEFINITION ²	
		Maximum Moment Magnitude, M	Slip Rate, SR (mm/year)
A	Faults that are capable of producing large magnitude events and that have a high rate of seismic activity	M ≥ 7.0	SR ≥ 5
B	All faults other than Types A and C	M ≥ 7.0 M < 7.0 M ≥ 6.5	SR < 5 SR > 2 SR < 2
C	Faults that are not capable of producing large magnitude earthquakes and that have a relatively low rate of seismic activity	M < 6.5	SR ≤ 2

¹Subduction sources shall be evaluated on a site-specific basis.

²Both maximum moment magnitude and slip rate conditions must be satisfied concurrently when determining the seismic source type.

Tabla 6. Cálculo de la tasa anual de excedencia para diferentes probabilidades de excedencia y vida útil de las estructuras. Fuente propia

Probabilidad de excedencia		Probabilidad de excedencia		Probabilidad de excedencia	
0.001	0.01	0.05	0.1	0.5	1
0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
1	1	1	1	1	1

ANEXO A1
COEFICIENTES DE AJUSTE C1 Y C2 PARA PERFIL DE SUELO SUELTO SUPERFICIAL (SS) Y GRADO DE CONFIABILIDAD

PERFIL SUELTO SUPERFICIAL (SS)

CONFIABILIDAD DE 90 %

PERIODO (S)	C1	C2
0.001	0.5551	-0.009
0.1	1.2349	-0.011
0.2	1.4966	-0.009
0.3	1.0114	-0.009
0.4	0.8188	-0.009
0.5	0.6278	-0.008
0.6	0.5305	-0.008
0.75	0.3941	-0.008
0.9	0.3087	-0.007
1	0.276	-0.006
1.1	0.2476	-0.006
1.2	0.2297	-0.006
1.3	0.2137	-0.006
1.4	0.1919	-0.006
1.5	0.1652	-0.005
1.6	0.1521	-0.005
1.8	0.1165	-0.005
1.9	0.1105	-0.005
2	0.1042	-0.005
2.5	0.0756	-0.004
3	0.0568	-0.004
3.5	0.0447	-0.003
4	0.038	-0.003

PERFIL SUELTO SUPERFICIAL (SS)

CONFIABILIDAD DE 95 %

PERIODO (S)	C1	C2
0.001	0.8189	-0.009
0.1	1.8914	-0.011
0.2	2.4716	-0.009
0.3	1.7126	-0.009
0.4	1.4367	-0.009
0.5	1.1239	-0.008
0.6	0.9784	-0.008
0.75	0.7434	-0.007
0.9	0.5937	-0.007
1	0.5365	-0.006
1.1	0.486	-0.006
1.2	0.4564	-0.006
1.3	0.4262	-0.006
1.4	0.3864	-0.006
1.5	0.3333	-0.005
1.6	0.3067	-0.005
1.8	0.235	-0.005
1.9	0.2226	-0.005
2	0.2114	-0.005
2.5	0.157	-0.004
3	0.118	-0.003
3.5	0.0942	-0.003
4	0.0633	-0.003

PERFIL SUELTO SUPERFICIAL (SS)

CONFIABILIDAD DE 98 %

PERIODO (S)	C1	C2
0.001	1.2698	-0.009
0.1	3.052	-0.011
0.2	4.3539	-0.009
0.3	3.1004	-0.009
0.4	2.7046	-0.009
0.5	2.1704	-0.008
0.6	1.9497	-0.008
0.75	1.5175	-0.007
0.9	1.2314	-0.007
1	1.1327	-0.006
1.1	1.0377	-0.006
1.2	0.99	-0.006
1.3	0.9272	-0.006
1.4	0.8502	-0.006
1.5	0.7323	-0.005
1.6	0.6741	-0.005
1.8	0.5185	-0.005
1.9	0.4919	-0.005
2	0.4679	-0.005
2.5	0.3549	-0.004
3	0.2719	-0.003
3.5	0.2174	-0.003
4	0.1063	-0.003

ANEXO A2
COEFICIENTES DE AJUSTE C1 Y C2 PARA PERFIL DE SUELO SUELTO INTERMEDIO (SI) Y GRADO DE CONFIABILIDAD

PERFIL SUELTO-INTERMEDIO (SI)			PERFIL SUELTO-INTERMEDIO (SI)			PERFIL SUELTO-INTERMEDIO (SI)		
CONFIABILIDAD DE 90 %			CONFIABILIDAD DE 95 %			CONFIABILIDAD DE 98 %		
PERIODO (S)	C1	C2	PERIODO (S)	C1	C2	PERIODO (S)	C1	C2
0.001	0.4927	-0.009	0.001	0.7136	-0.009	0.001	1.0808	-0.009
0.1	0.934	-0.01	0.1	1.334	-0.01	0.1	1.9921	-0.01
0.2	1.4622	-0.009	0.2	2.2969	-0.009	0.2	3.8202	-0.009
0.3	1.3747	-0.009	0.3	2.2691	-0.009	0.3	3.9883	-0.009
0.4	1.3336	-0.009	0.4	2.2593	-0.009	0.4	4.1055	-0.008
0.5	1.0675	-0.008	0.5	1.8521	-0.008	0.5	3.4464	-0.008
0.6	0.8882	-0.008	0.6	1.5808	-0.008	0.6	3.0368	-0.008
0.75	0.6289	-0.008	0.75	1.1423	-0.008	0.75	2.2405	-0.008
0.9	0.4958	-0.008	0.9	0.9199	-0.008	0.9	1.8379	-0.008
1	0.4308	-0.007	1	0.8055	-0.007	1	1.627	-0.007
1.1	0.3754	-0.007	1.1	0.7088	-0.007	1.1	1.4476	-0.007
1.2	0.3429	-0.007	1.2	0.6573	-0.007	1.2	1.3658	-0.007
1.3	0.3206	-0.007	1.3	0.6172	-0.007	1.3	1.2904	-0.007
1.4	0.2939	-0.007	1.4	0.5526	-0.007	1.4	1.1745	-0.007
1.5	0.2405	-0.007	1.5	0.4733	-0.007	1.5	1.0091	-0.007
1.6	0.2195	-0.007	1.6	0.432	-0.007	1.6	0.9251	-0.007
1.8	0.1639	-0.006	1.8	0.3239	-0.006	1.8	0.6955	-0.006
1.9	0.1525	-0.006	1.9	0.3009	-0.006	1.9	0.6504	-0.006
2	0.1425	-0.006	2	0.2819	-0.006	2	0.6083	-0.006
2.5	0.0972	-0.005	2.5	0.196	-0.005	2.5	0.4326	-0.005
3	0.0725	-0.005	3	0.1471	-0.005	3	0.327	-0.005
3.5	0.0558	-0.005	3.5	0.1154	-0.005	3.5	0.26	-0.005
4	0.0459	-0.004	4	0.0947	-0.004	4	0.2144	-0.004

ANEXO A3
COEFICIENTES DE AJUSTE C1 Y C2 PARA PERFIL DE SUELO SUELTO PROFUNDO (SP) Y GRADO DE CONFIABILIDAD

PERFIL SUELTO-PROFUNDO (SP)			PERFIL SUELTO-PROFUNDO (SP)			PERFIL SUELTO-PROFUNDO (SP)		
CONFIABILIDAD DE 90 %			CONFIABILIDAD DE 95 %			CONFIABILIDAD DE 98 %		
PERIODO (S)	C1	C2	PERIODO (S)	C1	C2	PERIODO (S)	C1	C2
0.001	0.3418	-0.007	0.001	0.5342	-0.007	0.001	0.884	-0.007
0.1	0.5883	-0.009	0.1	0.9165	-0.009	0.1	1.5078	-0.009
0.2	0.965	-0.008	0.2	1.578	-0.008	0.2	2.7532	-0.008
0.3	0.9213	-0.007	0.3	1.5402	-0.007	0.3	2.7487	-0.007
0.4	0.8067	-0.008	0.4	1.3664	-0.008	0.4	2.4779	-0.008
0.5	0.6991	-0.007	0.5	1.2016	-0.007	0.5	2.2116	-0.007
0.6	0.6151	-0.007	0.6	1.0918	-0.007	0.6	2.0813	-0.007
0.75	0.5521	-0.006	0.75	1.0094	-0.006	0.75	1.9878	-0.006
0.9	0.533	-0.006	0.9	1.0136	-0.006	0.9	2.0871	-0.006
1	0.4811	-0.006	1	0.9258	-0.006	1	1.9388	-0.006
1.1	0.4312	-0.006	1.1	0.844	-0.006	1.1	1.7953	-0.006
1.2	0.4021	-0.005	1.2	0.7984	-0.005	1.2	1.7248	-0.005
1.3	0.3752	-0.005	1.3	0.748	-0.005	1.3	1.621	-0.005
1.4	0.3273	-0.005	1.4	0.6553	-0.005	1.4	1.4324	-0.005
1.5	0.2756	-0.005	1.5	0.555	-0.005	1.5	1.2248	-0.005
1.6	0.2482	-0.005	1.6	0.502	-0.005	1.6	1.1095	-0.005
1.8	0.1795	-0.004	1.8	0.361	-0.004	1.8	0.7988	-0.004
1.9	0.1666	-0.004	1.9	0.3346	-0.004	1.9	0.7358	-0.004
2	0.1564	-0.004	2	0.3168	-0.004	2	0.6988	-0.004
2.5	0.1142	-0.003	2.5	0.2363	-0.003	2.5	0.5356	-0.003
3	0.0843	-0.003	3	0.1765	-0.003	3	0.4058	-0.003
3.5	0.0676	-0.002	3.5	0.1451	-0.002	3.5	0.3409	-0.002
4	0.0561	-0.002	4	0.12	-0.002	4	0.2863	-0.002

ANEXO A4
COEFICIENTES DE AJUSTE C1 Y C2 PARA PERFIL DE SUELO MEDIO SUPERFICIAL (MS) Y GRADO DE CONFIABILIDAD

PERFIL MEDIO-SUPERFICIAL (MS)

CONFIABILIDAD DE 90 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,5574	-0,011
0,1	1,3665	-0,011
0,2	1,2728	-0,011
0,3	0,8619	-0,01
0,4	0,7625	-0,01
0,5	0,5942	-0,009
0,6	0,5181	-0,009
0,75	0,3939	-0,008
0,9	0,3133	-0,008
1	0,269	-0,008
1,1	0,2486	-0,007
1,2	0,2351	-0,007
1,3	0,207	-0,007
1,4	0,1963	-0,007
1,5	0,1695	-0,007
1,6	0,156	-0,006
1,8	0,1191	-0,006
1,9	0,1143	-0,006
2	0,1001	-0,006
2,5	0,0755	-0,005
3	0,056	-0,004
3,5	0,0443	-0,004
4	0,0352	-0,003

PERFIL MEDIO-SUPERFICIAL (MS)

CONFIABILIDAD DE 95 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,8311	-0,011
0,1	2,0593	-0,011
0,2	2,0869	-0,011
0,3	1,4415	-0,01
0,4	1,3279	-0,01
0,5	1,0543	-0,009
0,6	0,9472	-0,009
0,75	0,7407	-0,009
0,9	0,6001	-0,008
1	0,5228	-0,008
1,1	0,4901	-0,007
1,2	0,4662	-0,007
1,3	0,412	-0,007
1,4	0,3937	-0,007
1,5	0,3409	-0,007
1,6	0,3165	-0,006
1,8	0,243	-0,006
1,9	0,2301	-0,006
2	0,2032	-0,006
2,5	0,1609	-0,005
3	0,1178	-0,004
3,5	0,0951	-0,004
4	0,0763	-0,003

PERFIL MEDIO-SUPERFICIAL (MS)

CONFIABILIDAD DE 98 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	1,2904	-0,011
0,1	3,2647	-0,011
0,2	3,6421	-0,011
0,3	2,5702	-0,01
0,4	2,4788	-0,01
0,5	2,0114	-0,009
0,6	1,8703	-0,009
0,75	1,5052	-0,008
0,9	1,2438	-0,008
1	1,1047	-0,008
1,1	1,0507	-0,008
1,2	1,0071	-0,007
1,3	0,8968	-0,007
1,4	0,8641	-0,007
1,5	0,7507	-0,007
1,6	0,6977	-0,006
1,8	0,5379	-0,006
1,9	0,5111	-0,006
2	0,4572	-0,006
2,5	0,3674	-0,005
3	0,2722	-0,004
3,5	0,2228	-0,004
4	0,1797	-0,003

ANEXO A5
COEFICIENTES DE AJUSTE C1 Y C2 PARA PERFIL DE SUELO MEDIO INTERMEDIO (MI) Y GRADO DE CONFIABILIDAD

PERFIL MEDIO-INTERMEDIO (MI)

CONFIABILIDAD DE 90 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,5205	-0,009
0,1	1,0736	-0,01
0,2	1,5123	-0,009
0,3	1,3238	-0,008
0,4	1,2298	-0,008
0,5	0,9448	-0,008
0,6	0,8107	-0,008
0,75	0,5752	-0,007
0,9	0,4322	-0,007
1	0,35	-0,006
1,1	0,3142	-0,006
1,2	0,2906	-0,006
1,3	0,2543	-0,006
1,4	0,2361	-0,006
1,5	0,2012	-0,006
1,6	0,1842	-0,005
1,8	0,1413	-0,005
1,9	0,1327	-0,005
2	0,1176	-0,005
2,5	0,087	-0,004
3	0,0642	-0,004
3,5	0,0508	-0,003
4	0,04	-0,003

PERFIL MEDIO-INTERMEDIO (MI)

CONFIABILIDAD DE 95 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,7516	-0,009
0,1	1,5435	-0,01
0,2	2,3809	-0,009
0,3	2,1775	-0,008
0,4	2,1145	-0,008
0,5	1,6637	-0,008
0,6	1,4827	-0,008
0,75	1,0849	-0,007
0,9	0,83	-0,007
1	0,6818	-0,006
1,1	0,6175	-0,006
1,2	0,5754	-0,006
1,3	0,5069	-0,006
1,4	0,4727	-0,006
1,5	0,4032	-0,005
1,6	0,3691	-0,005
1,8	0,2843	-0,005
1,9	0,267	-0,005
2	0,2379	-0,005
2,5	0,1778	-0,004
3	0,1326	-0,004
3,5	0,1056	-0,003
4	0,0838	-0,003

PERFIL MEDIO-INTERMEDIO (MI)

CONFIABILIDAD DE 98 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	1,1372	-0,009
0,1	2,3207	-0,01
0,2	3,9663	-0,009
0,3	3,8127	-0,008
0,4	3,891	-0,008
0,5	3,1469	-0,008
0,6	2,9228	-0,008
0,75	2,2139	-0,007
0,9	1,7305	-0,007
1	1,4427	-0,006
1,1	1,3261	-0,006
1,2	1,2394	-0,006
1,3	1,1007	-0,005
1,4	1,0318	-0,006
1,5	0,8815	-0,005
1,6	0,8059	-0,005
1,8	0,6227	-0,005
1,9	0,587	-0,005
2	0,5264	-0,005
2,5	0,398	-0,004
3	0,3002	-0,004
3,5	0,241	-0,003
4	0,1923	-0,003

ANEXO A6

COEFICIENTES DE AJUSTE C1 Y C2 PARA PERFIL DE SUELO MEDIO PROFUNDO (MP) Y GRADO DE CONFIABILIDAD

PERFIL MEDIO-PROFUNDO (MP)			PERFIL MEDIO-PROFUNDO (MP)			PERFIL MEDIO-PROFUNDO (MP)		
CONFIABILIDAD DE 90 %			CONFIABILIDAD DE 95 %			CONFIABILIDAD DE 98 %		
PERIODO (S)	C1	C2	PERIODO (S)	C1	C2	PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,4008	-0,011	0,001	0,5931	-0,011	0,001	0,9218	-0,011
0,1	0,7628	-0,012	0,1	1,1209	-0,012	0,1	1,7275	-0,012
0,2	1,0471	-0,011	0,2	1,6112	-0,011	0,2	2,6207	-0,011
0,3	0,9897	-0,01	0,3	1,5701	-0,01	0,3	2,6341	-0,01
0,4	0,9019	-0,009	0,4	1,4549	-0,009	0,4	2,4908	-0,009
0,5	0,8165	-0,01	0,5	1,3604	-0,009	0,5	2,419	-0,009
0,6	0,7411	-0,009	0,6	1,266	-0,009	0,6	2,3104	-0,009
0,75	0,6163	-0,009	0,75	1,0779	-0,009	0,75	2,0199	-0,009
0,9	0,5198	-0,008	0,9	0,9245	-0,008	0,9	1,7677	-0,008
1	0,4599	-0,008	1	0,829	-0,008	1	1,6107	-0,008
1,1	0,4405	-0,007	1,1	0,8068	-0,007	1,1	1,6044	-0,007
1,2	0,4233	-0,007	1,2	0,7848	-0,007	1,2	1,5705	-0,007
1,3	0,3844	-0,007	1,3	0,722	-0,007	1,3	1,4657	-0,007
1,4	0,3528	-0,007	1,4	0,6654	-0,007	1,4	1,3572	-0,007
1,5	0,3093	-0,006	1,5	0,5869	-0,006	1,5	1,2067	-0,006
1,6	0,2809	-0,006	1,6	0,5343	-0,006	1,6	1,0982	-0,006
1,8	0,2322	-0,006	1,8	0,4447	-0,006	1,8	0,9251	-0,006
1,9	0,22	-0,006	1,9	0,4231	-0,006	1,9	0,8885	-0,006
2	0,2055	-0,006	2	0,4023	-0,006	2	0,8586	-0,006
2,5	0,1574	-0,005	2,5	0,3194	-0,005	2,5	0,7039	-0,005
3	0,1027	-0,006	3	0,243	-0,005	3	0,5472	-0,005
3,5	0,093	-0,003	3,5	0,194	-0,005	3,5	0,4434	-0,005
4	0,0727	-0,003	4	0,1541	-0,005	4	0,3566	-0,005

ANEXO A7

COEFICIENTES DE AJUSTE C1 Y C2 PARA PERFIL DE SUELO DENSO SUPERFICIAL (DS) Y GRADO DE CONFIABILIDAD

PERFIL DENSO-SUPERFICIAL (DS)			PERFIL DENSO-SUPERFICIAL (DS)			PERFIL DENSO-SUPERFICIAL (DS)		
CONFIABILIDAD DE 90 %			CONFIABILIDAD DE 95 %			CONFIABILIDAD DE 98 %		
PERIODO (S)	C1	C2	PERIODO (S)	C1	C2	PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,4652	-0,011	0,001	0,7059	-0,011	0,001	1,1276	-0,011
0,1	1,0115	-0,013	0,1	1,5563	-0,013	0,1	2,5361	-0,013
0,2	0,9821	-0,011	0,2	1,5851	-0,011	0,2	2,7151	-0,011
0,3	0,7963	-0,01	0,3	1,3327	-0,01	0,3	2,377	-0,01
0,4	0,7453	-0,01	0,4	1,2955	-0,01	0,4	2,4147	-0,01
0,5	0,5955	-0,009	0,5	1,0588	-0,009	0,5	2,0242	-0,009
0,6	0,5256	-0,009	0,6	0,9615	-0,009	0,6	1,8989	-0,009
0,75	0,407	-0,008	0,75	0,766	-0,008	0,75	1,5577	-0,008
0,9	0,3316	-0,008	0,9	0,6361	-0,008	0,9	1,323	-0,008
1	0,2965	-0,008	1	0,5716	-0,008	1	1,2032	-0,008
1,1	0,2663	-0,007	1,1	0,5172	-0,007	1,1	1,0992	-0,007
1,2	0,2457	-0,007	1,2	0,4877	-0,007	1,2	1,0531	-0,007
1,3	0,2264	-0,007	1,3	0,4525	-0,007	1,3	0,9823	-0,007
1,4	0,2034	-0,007	1,4	0,4106	-0,007	1,4	0,901	-0,007
1,5	0,1782	-0,006	1,5	0,3612	-0,006	1,5	0,7966	-0,006
1,6	0,1629	-0,006	1,6	0,3302	-0,006	1,6	0,7306	-0,006
1,8	0,1276	-0,006	1,8	0,2587	-0,006	1,8	0,5753	-0,006
1,9	0,1187	-0,006	1,9	0,2422	-0,006	1,9	0,5393	-0,006
2	0,1107	-0,006	2	0,2273	-0,006	2	0,5079	-0,006
2,5	0,0793	-0,005	2,5	0,1656	-0,005	2,5	0,3812	-0,005
3	0,0585	-0,004	3	0,1243	-0,004	3	0,2907	-0,004
3,5	0,0464	-0,004	3,5	0,1004	-0,004	3,5	0,239	-0,004
4	0,0383	-0,003	4	0,0832	-0,003	4	0,199	-0,003

ANEXO A8
COEFICIENTES DE AJUSTE C1 Y C2 PARA PERFIL DE SUELO DENSO INTERMEDIO (DI) Y GRADO DE CONFIABILIDAD

PERFIL DENSO-INTERMEDIO (DI)

CONFIABILIDAD DE 90 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,5963	-0,011
0,1	1,2183	-0,012
0,2	1,6706	-0,01
0,3	1,2866	-0,009
0,4	1,0798	-0,009
0,5	0,7807	-0,008
0,6	0,6311	-0,008
0,75	0,4501	-0,007
0,9	0,3449	-0,007
1	0,3035	-0,006
1,1	0,2707	-0,006
1,2	0,249	-0,006
1,3	0,2319	-0,006
1,4	0,2083	-0,005
1,5	0,1814	-0,005
1,6	0,1658	-0,005
1,8	0,1297	-0,005
1,9	0,1205	-0,005
2	0,114	-0,005
2,5	0,0808	-0,004
3	0,0609	-0,003
3,5	0,0472	-0,003
4	0,0379	-0,003

PERFIL DENSO-INTERMEDIO (DI)

CONFIABILIDAD DE 95 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,7803	-0,011
0,1	1,801	-0,012
0,2	2,647	-0,01
0,3	2,0952	-0,009
0,4	1,8176	-0,009
0,5	1,3394	-0,008
0,6	1,117	-0,008
0,75	0,811	-0,007
0,9	0,63	-0,007
1	0,5605	-0,006
1,1	0,5029	-0,006
1,2	0,4681	-0,006
1,3	0,4385	-0,006
1,4	0,3972	-0,005
1,5	0,3477	-0,005
1,6	0,3181	-0,005
1,8	0,2489	-0,005
1,9	0,2335	-0,005
2	0,2208	-0,006
2,5	0,1594	-0,004
3	0,1217	-0,003
3,5	0,0956	-0,003
4	0,077	-0,002

PERFIL DENSO-INTERMEDIO (DI)

CONFIABILIDAD DE 98 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	1,0264	-0,011
0,1	2,7968	-0,012
0,2	4,4379	-0,01
0,3	3,628	-0,009
0,4	3,2685	-0,009
0,5	2,4585	-0,008
0,6	2,103	-0,008
0,75	1,5691	-0,007
0,9	1,2383	-0,007
1	1,1134	-0,006
1,1	1,0121	-0,006
1,2	0,9535	-0,006
1,3	0,898	-0,006
1,4	0,8235	-0,005
1,5	0,7212	-0,005
1,6	0,6617	-0,005
1,8	0,5222	-0,005
1,9	0,4902	-0,005
2	0,4646	-0,005
2,5	0,3425	-0,004
3	0,2646	-0,003
3,5	0,2109	-0,003
4	0,1712	-0,003

ANEXO A9
COEFICIENTES DE AJUSTE C1 Y C2 PARA PERFIL DE SUELO DENSO PROFUNDO (DP) Y GRADO DE CONFIABILIDAD

PERFIL DENSO-PROFUNDO (DP)

CONFIABILIDAD DE 90 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,3297	-0,008
0,1	0,6449	-0,01
0,2	0,8711	-0,009
0,3	0,7467	-0,007
0,4	0,6455	-0,006
0,5	0,5697	-0,006
0,6	0,5194	-0,005
0,75	0,4121	-0,004
0,9	0,3351	-0,003
1	0,2875	-0,003
1,1	0,2551	-0,002
1,2	0,2351	-0,002
1,3	0,2143	-0,002
1,4	0,1906	-0,001
1,5	0,1681	-0,001
1,6	0,1533	-0,0007
1,8	0,1229	-0,0001
1,9	0,113	0,0001
2	0,1039	0,0003
2,5	0,0696	0,0013
3	0,0508	0,002
3,5	0,0386	0,0027
4	0,0305	0,0029

PERFIL DENSO-PROFUNDO (DP)

CONFIABILIDAD DE 95 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,4879	-0,008
0,1	0,9536	-0,01
0,2	1,3357	-0,009
0,3	1,1618	-0,007
0,4	1,0266	-0,006
0,5	0,9267	-0,006
0,6	0,8675	-0,005
0,75	0,7026	-0,004
0,9	0,582	-0,003
1	0,5061	-0,003
1,1	0,4512	-0,002
1,2	0,4214	-0,002
1,3	0,3886	-0,002
1,4	0,3475	-0,001
1,5	0,3091	-0,001
1,6	0,2833	-0,0007
1,8	0,2298	-0,0001
1,9	0,2131	0,0001
2	0,1971	0,0004
2,5	0,1355	0,0013
3	0,1006	0,002
3,5	0,0786	0,0026
4	0,0623	0,0029

PERFIL DENSO-PROFUNDO (DP)

CONFIABILIDAD DE 98 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,7573	-0,008
0,1	1,4797	-0,01
0,2	2,1634	-0,009
0,3	1,9117	-0,007
0,4	1,7304	-0,006
0,5	1,6031	-0,006
0,6	1,5447	-0,005
0,75	1,2832	-0,004
0,9	1,0833	-0,003
1	0,9511	-0,003
1,1	0,8561	-0,002
1,2	0,8136	-0,002
1,3	0,7579	-0,002
1,4	0,6847	-0,001
1,5	0,6148	-0,001
1,6	0,5666	-0,0007
1,8	0,4665	-0,0001
1,9	0,4361	0,0001
2	0,4068	0,0003
2,5	0,287	0,0013
3	0,2191	0,002
3,5	0,1738	0,0026
4	0,1387	0,0029

