

## **METODOLOGÍA ALTERNATIVA PARA GENERAR ESPECTROS DE DISEÑO ELÁSTICOS POR GRADO DE CONFIABILIDAD ATENDIENDO AL MAPA DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA O LA SISMOTECTÓNICA PROPIA DEL LUGAR**

*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**

Se presenta una metodología alternativa para generar espectros de diseño elásticos por niveles de confianza seleccionados, utilizando la distribución lognormal, atendiendo a los mapas de zonificación sísmica que existen en las normas de diseño sismorresistentes o la sismotectónica propia del lugar, utilizando bases de datos sísmológicas, complementado con estudios de propagación de ondas y la tipología del perfil de suelo.

*Palabras clave:* espectro de diseño elástico, sismorresistente, confiabilidad, lognormal, zonificación, sismotectónica

### **ALTERNATIVE METHODS FOR GENERATING ELASTIC DESIGN SPECTRA BY DEGREE OF RELIABILITY ATTENDING SEISMIC ZONING MAP OR SEISMIC TECTONICS ON PLACE**

#### **ABSTRACT**

An alternative methodology is presented to generate elastic design spectra by levels of selected confidence, using the lognormal distribution, based on the seismic zoning maps that exist in the standard codes or seismic tectonics on place, using base seismological data, supplemented with studies of wave propagation and the type of soil profile.

*Keywords:* elastic design spectra, seismic resistance, reliability, lognormal, zoning, seismic tectonic

#### **ANTECEDENTES**

Numerosos estudios han sido realizados en el pasado para definir los espectros de respuesta elásticos de estructuras de 1 grado de libertad. Para ello, se ha recurrido a registros de historias de aceleraciones medidos en superficie en diferentes depósitos de suelos, complementados con algoritmos de cálculo unidimensionales como el programa SHAKE, desarrollado por Schnabel, Lysmer y Seed (1972).

Dichas mediciones y estudios constituyen la base hoy en día para generar los espectros de diseño o espectros de respuesta suavizados en diferentes códigos o normas a nivel mundial.

A título de ejemplo se muestra en la Figura 1, como ha ido evolucionando en el tiempo los espectros de diseño incorporados en los diferentes códigos de diseño

sismorresistentes. Iniciando con uno de los primeros propuesto por Housner (1959), a partir de los sismos del Centro (California, 1934 y 1940), Olimpia (Washington 1949) y Taft (California 1952), continuando con los trabajos de Seed, Ugas y Lysmer (1976), los códigos de la ATC (1996), SEAOC (1995), NERPH (1997) y la Norma Covenin Venezolana 1756 (2001) que se muestran en la Figura 2.

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 EE. UU., implementada por la USGS (2008), 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 Vs30 (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.

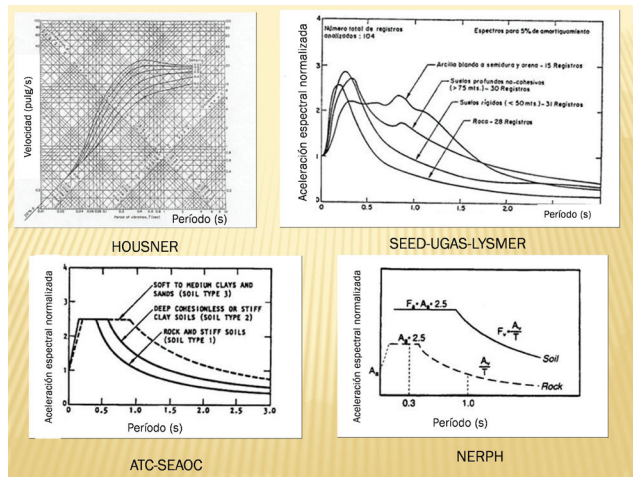


Figura 1. Espectros de diseño elástico incorporados en diferentes códigos de diseño (fuente propia)

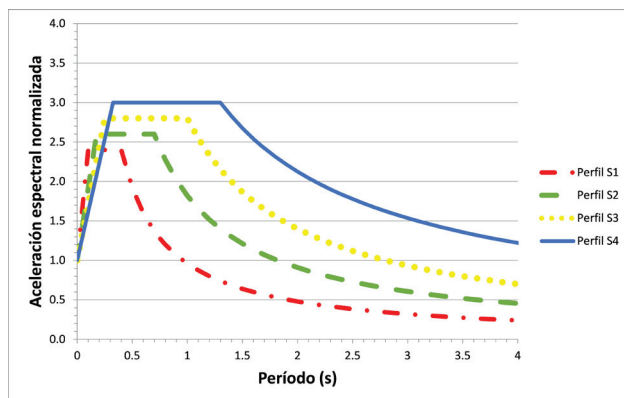


Figura 2. Espectros suavizados para cuatro perfiles de suelos. Construidas a partir de la Norma Covenin 1756-01, “Edificaciones Sismorresistentes”, Fondonorma, Funvisis, Caracas, Marzo, 2001

En años recientes, en un proyecto llevado a cabo en la costa pacífica de los Estados Unidos, conocido como NGA (next generation attenuation), varios investigadores como Campbell y Bozorgnia (1997, 2004, 2007), Idriss (2007), Abrahamson y Silva (1995, 2007), Boore y Atkinson (2007), Sadigh et. al. (1997) han desarrollado modelos o

leyes de atenuación elaborados, en los cuales se incorporan 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 (Vs30), 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, que puede ser aplicable a regiones que posean una sismo-tectónica similar.

En Venezuela, la incorporación del espectro para el diseño sismorresistente de edificaciones fue realizada en el año 1982, sufriendo igualmente, modificaciones en el tiempo, hasta llegar hoy en día a la Norma Covenin 1756 (2001), norma que regula el diseño de edificaciones sismorresistentes.

En el estudio de Rivero y Lobo (1996), titulado “Formas Espectrales para suelos considerando comportamiento no lineal”, se realiza el análisis numérico de 12 perfiles de suelos con profundidades comprendidas entre 10 m y 70 m, utilizando programas en 1-D y 2-D, los cuales consideran el comportamiento inelástico e histerético del suelo. Como resultado se proponen nuevas formas espectrales para cuatro categorías de suelos: tipo S1, S2, S3 y S4 como se muestra en la Figura 2, estudio que constituyó las bases para definir los espectros de diseño de la norma venezolana vigente.

En años posteriores, con miras a definir los espectros de diseño asociados a la frecuencia del evento, período de retorno y probabilidad de excedencia, para ser incorporados en estudios de desempeño estructural, se han realizado varias investigaciones, entre las que se mencionan los trabajos de Bendito et. al. (2001) y Aguiar (2004), titulados: Curvas de Isoaceleración para estados de desempeño estructural en el Occidente de Venezuela y espectros sísmicos de riesgo uniforme para verificar el desempeño estructural en países Sudamericanos.

En el primero de ellos, se estudia la amenaza sísmica (aceleración esperada en el terreno) para la región occidental del país atendiendo a diferentes niveles de probabilidades de excedencia de los eventos sísmicos, basados en leyes de atenuación desarrolladas en otros países, con similar comportamiento sismogénico al venezolano. En ese estudio, se predicen los valores de aceleración esperados para el occidente de Venezuela al considerar varios niveles de probabilidades de ocurrencia, asociados a los sismos

denominados por FEMA (2000) como: frecuente, ocasional, raro y muy raro.

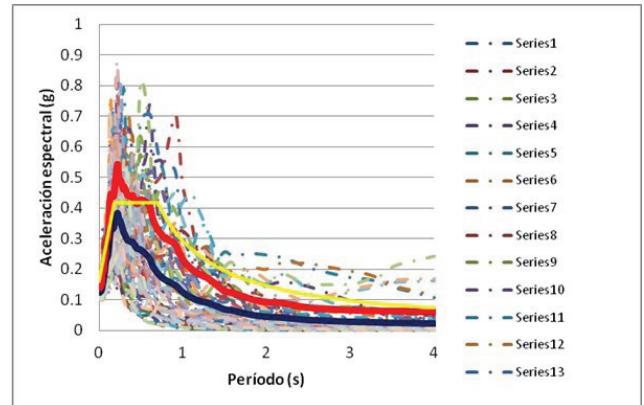
En el segundo, se presentan propuestas para generar formas espectrales para los sismos frecuentes, ocasionales, raros y muy raros para los países suramericanos, obteniéndolos, a partir del espectro elástico presente en cada código de diseño y multiplicándolos por unos factores de reducción o amplificación dependiendo del caso, basado en las ecuaciones de Newmark y Hall (1969), (valores de amplificación de la aceleración, velocidad y desplazamiento), complementado con la experiencia propia de cada país.

Particularmente en el caso de Venezuela para la industria petrolera, se ha utilizado el Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA JA-221 (1999), en el cual existen mapas de amenaza sísmica para todo el país, representados por los parámetros de diseño  $a^*$  y  $\gamma$ , los cuales permiten calcular la aceleración máxima del terreno ( $a_0$ ) asociada a una determinada probabilidad de excedencia, para una cierta vida útil.

Los estudios anteriormente comentados constituyen la base hoy en día para generar los espectros de diseño o espectros de respuesta suavizados en los diferentes códigos o normas a nivel mundial.

Sin embargo, a la fecha, no han sido realizados estudios que permitan cuantificar cual es la probabilidad de que ocurran determinados valores en las ordenadas espectrales, en función del período natural de vibración de la estructura, atendiendo a los perfiles típicos de suelos, los estudios hasta ahora se han enfocado en la determinación del valor medio de la aceleración en roca o en superficie y no en el estudio probabilístico de la variabilidad de los valores en las ordenadas espectrales.

Comúnmente, cuando se hacen simulaciones de propagación de ondas a través del depósito de suelo con diferentes sismos instrumentales, se obtiene una familia de espectros de respuesta a las cuales se les calcula el valor medio (línea azul de la Figura 3), la media más la desviación estándar (línea roja de la Figura 3), luego un comité de expertos traza un espectro de diseño suavizado (línea amarilla de la Figura 3) que se aproxima a la media más una desviación estándar. El inconveniente de esto es que al suavizar la curva se omiten los picos que resultan en las ordenadas espectrales para períodos bajos y el otro aspecto es que ya no es un espectro de riesgo uniforme o con el mismo nivel de confianza. La representación de lo anteriormente comentado se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Espectro de Diseño (suavizado). Fuente propia

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una nueva metodología para obtener espectros de diseño elásticos por grado de confiabilidad (espectros de riesgo uniforme) en función del mapa de zonificación sísmica, donde se conoce la aceleración ( $a_0$ ) esperada en superficie o alternativamente se conoce la tasa anual de excedencia de las fuentes sismogénicas, complementado con la distancia epicentral y los perfiles típicos de suelos, utilizando bases de datos sísmológicas de la red mundial y el estudio de propagación de ondas en el subsuelo.

En este estudio, se propone trabajar con un espectro uniforme o de igual porcentaje o probabilidad de ocurrencia para diferentes períodos 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 Echezuría (2012), se ha establecido la correspondencia entre los niveles de confianza, el período de retorno y la vida útil utilizando el modelo de Poisson.

Particularmente en la aplicación del método se asume que la distancia epicentral de la fuente sísmica al sitio de estudio es conocida y se considera de forma determinística.

## METODOLOGÍA

La metodología a seguir para cumplir con el objetivo propuesto en este estudio se presenta continuación:

- Ubicación y selección de código de cálculo o programa que permita evaluar la respuesta dinámica de suelos. Particularmente en este estudio se ha seleccionado el programa CYCLIC 1D el cual permite considerar

los efectos de degradación de rigidez y resistencia, incrementos en las presiones de poros, cambios en los esfuerzos efectivos, cambios en la resistencia al corte de los suelos, comportamiento contractivo o dilatante de las arenas, entre otros, al ser excitado el suelo por acciones sísmicas.

- Construir perfiles de suelo de compacidad o consistencia conocida tipificados como: arenas sueltas o arcillas blandas (S) con velocidad de ondas de corte menores o iguales a 185 m/s, arenas medianamente densas o arcillas de consistencia media (M) con velocidad de ondas de corte comprendidas entre 185 y 250 m/s y arenas densas o arcillas duras (D) con velocidad de ondas de corte mayores a 250 m/s. De espesores variables que se designarán como superficiales (S) para espesores de depósitos comprendidos entre 0 y 5 m, como depósitos intermedios (I) para espesores de depósitos comprendidos entre 5 y 30 m y como depósitos profundos (P) para espesores de depósitos superiores a 30 metros (ver Figura 4).

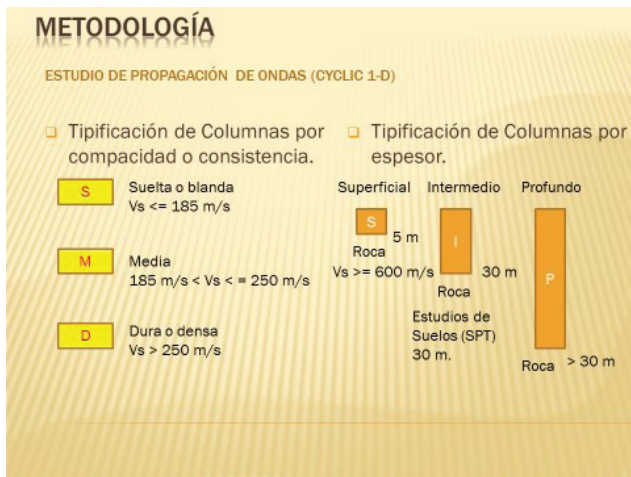


Figura 4. Tipificación de columnas de suelo

Los rangos de velocidades de ondas de corte a fin de definir la compacidad o consistencia utilizados en este estudio se corresponden con la clasificación que realiza el programa Cyclic 1-D, las cuales son: para el perfil suelto o blando (S) menor o igual a 185 m/s, para el perfil medio (M) entre 185 m/s y 250 m/s y para el perfil denso o duro (D) velocidades de ondas de corte mayores a 250 m/s.

La selección del espesor de 30 m, como perfil de espesor intermedio, obedece a que la gran mayoría de las estaciones sismológicas utilizan como caracterización el valor de

VS30, valor que representa la velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 m del perfil. Adicionalmente, muchos de los estudios de suelos para edificaciones, en los cuales se utiliza el ensayo de penetración normal (SPT), se limitan a profundidades de exploración que no superan los 30 m.

Se ha considerado que la roca o base del depósito que permite definir el espesor de la columna de suelo se corresponde con un material que posee velocidad de ondas de corte mayor o igual a 600 m/s.

- Seleccionar sismos instrumentales registrados en roca que posean variabilidad en duración, contenido frecuencial y aceleración sísmica.
- Aplicar en la base de cada uno de los perfiles geotécnicos los acelerogramas de entrada definidos anteriormente.
- Obtener la historia de aceleraciones en superficie.
- A partir de la historia de aceleraciones en superficie construir los espectros de respuesta para una estructura elástica de 1 grado de libertad.
- Adicionalmente para complementar la base de datos se tomarán sismos de la red mundial entre los cuales se destacan: la base de datos de la Universidad de Berkeley en California (PEER) (1153 registros), algunos sismos de la base de datos de Japón (NIED) (243 registros) y algunos sismos de la base de datos COSMOS (66 registros). En estas, atendiendo a la información geotécnica que se tiene del perfil donde están ubicadas las estaciones sismológicas, como la velocidad de las ondas de corte en los primeros 30 metros del depósito,  $V_{s30}$ , la clasificación del perfil de suelo propuesto por varios autores como: NERPH, Campbell, Bray y Rodríguez (reportado en la base de datos PEER), además del conocimiento al detalle del perfil de suelo donde se ubican las estaciones japonesas, se clasificaron los perfiles donde se realizaron las mediciones de aceleración de acuerdo con la tipificación indicada en el punto anterior, de la cual se generaron 9 casos posibles de columnas típicas de suelos, a saber:
  - 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.



Es decir, la primera letra está asociada a la compacidad o consistencia: suelta o blanda (S), media (M) y densa o dura (D). 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.

Adicionalmente se utilizó el programa CYCLIC 1D el cual permitió obtener espectros de respuesta en superficie al variar las características del depósito, compacidad o dureza y espesor, al aplicar en la base del mismo sismos instrumentales de la red mundial.

La distribución resultante de columnas típicas de suelos (5.446 registros) obtenidas a través del programa CYCLIC 1D, la base de datos de la PEER, la base de datos de Japón y la de Cosmos se muestran en la Tabla 1 anexa.

De ellas se destaca que la base de datos de California (PEER) posee escasa información en cuanto a perfiles de suelos de compacidad suelta o blanda a media en el rango de espesores superficiales a medios, por ello, se ha utilizado adicionalmente el programa Cyclic 1D con el fin de completar la base de datos y tener un amplio espectro de consistencias o compacidades y espesores de columnas de suelos.

- Realizar el análisis de las respuestas obtenidas cuantificando las aceleraciones espectrales por tipo de perfil, incluyendo los de las bases de datos de la red mundial y las obtenidas del estudio de propagación de ondas en el depósito.
- Paso seguido, utilizando un ajuste estadístico del tipo lognormal utilizando el programa Statgraphics, se definieron los valores de las ordenadas espectrales por nivel de confianza de 90 %, 95 % y 98 % por períodos fundamentales de vibración y tipo de perfil litológico. Atendiendo al estudio realizado por 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 definidos 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 (ver Tabla 2 anexa y ecuación 2).

Como ejemplo se muestran dos de las gráficas generadas para aceleraciones espectrales correspondientes a los períodos de 0,75 s y 1,1 s en uno de los casos analizados (Figuras 14 y 15).

La selección del tipo de distribución Lognormal se debe al hecho de que el programa Statgraphics dispone de algunos modelos de ajuste por nivel de confianza, entre los cuales están: Lognormal, Genextremvalue, Loglogistic, Weibull, Exponential y Normal. Haciendo un análisis aleatorio, para los diferentes casos de ajuste estudiados, se concluyó que entre los modelos disponibles para determinar el nivel de confianza el que mejor se ajustaba a la data era la distribución Lognormal.

El estudio del mejor modelo por aplicar se llevó a cabo utilizando el programa EASYFIT el cual permite comparar los diferentes modelos de ajuste y asignar un nivel o ranking en términos de bondades de ajuste del tipo Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi-Cuadrado.

Paso seguido, para cada valor de distancia epicentral y período se extrajo el valor de aceleración espectral para cierto nivel de confianza y se realizó un ajuste por mínimos cuadrados para obtener una ecuación general del tipo:

$$a = c_1 * e^{c_2 * x} \quad (1)$$

donde:

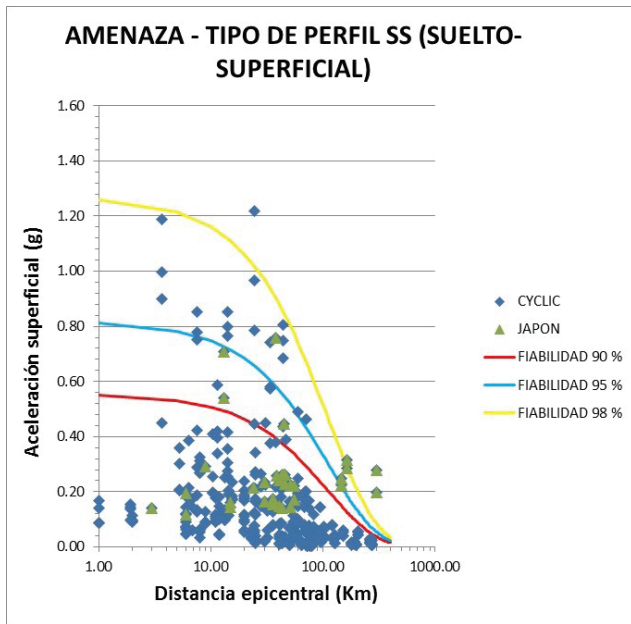
a = aceleración espectral (g)

$C_1$  y  $C_2$ : Coeficientes de ajuste.

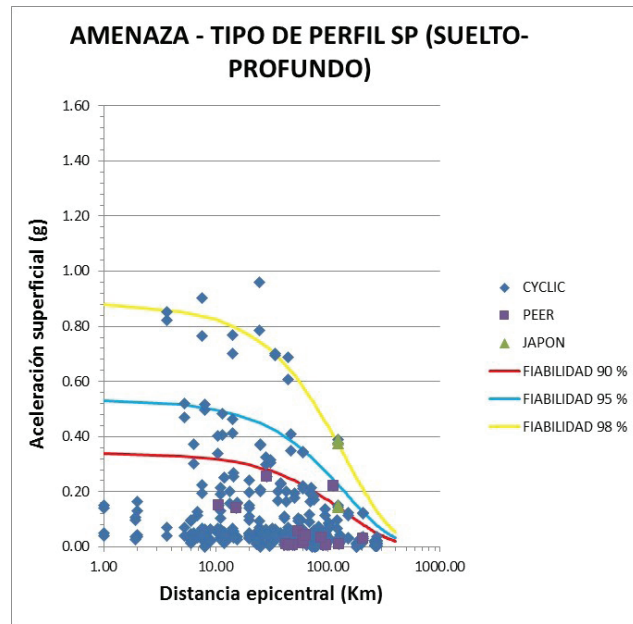
X: distancia epicentral (Km)

Los valores de los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$  asociados a los diferentes niveles de confianza y período natural de vibración por tipo de perfil se muestran en el anexo.

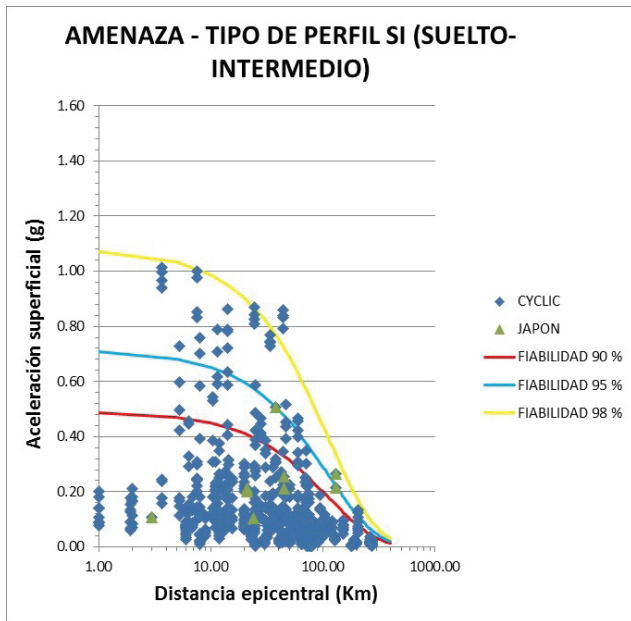
Dichos coeficientes permiten construir las curvas por niveles de confianza que se muestran en las Figuras 5 a 13 para un período de vibración de cero (aceleración superficial), en función de la distancia epicentral y con sismos transcurrentes de magnitudes menores o iguales a 8.



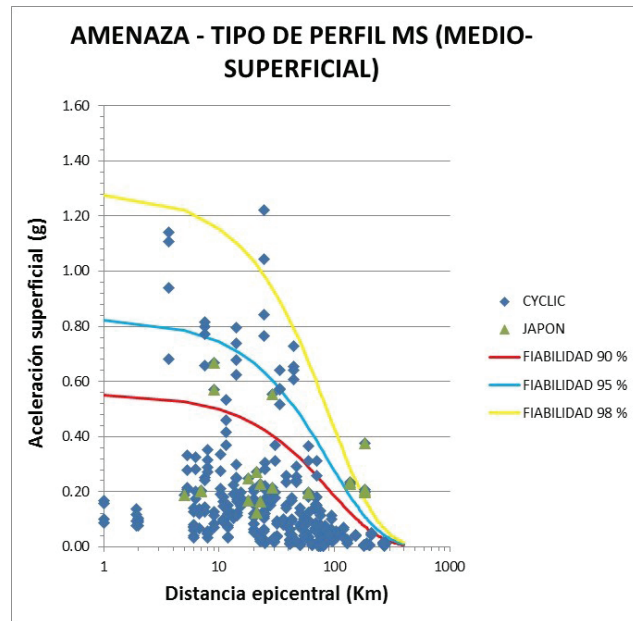
**Figura 5.** Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo SS (suelto o blando superficial). Fuente propia



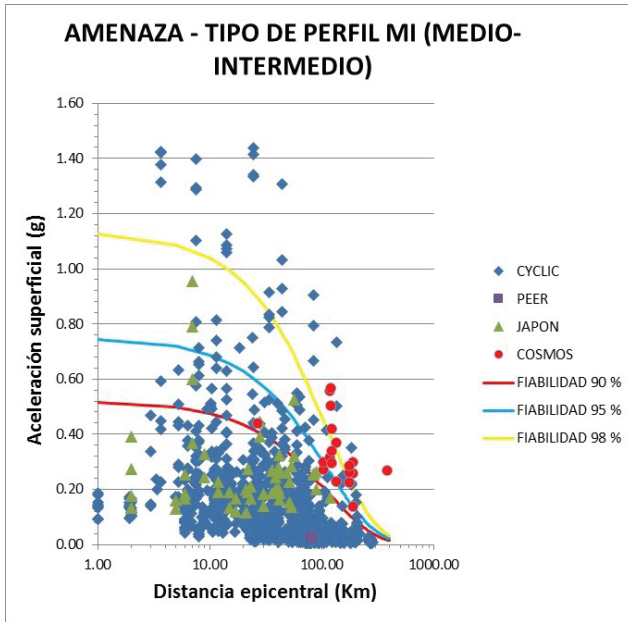
**Figura 7.** Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo SP (suelto o blando profundo). Fuente propia



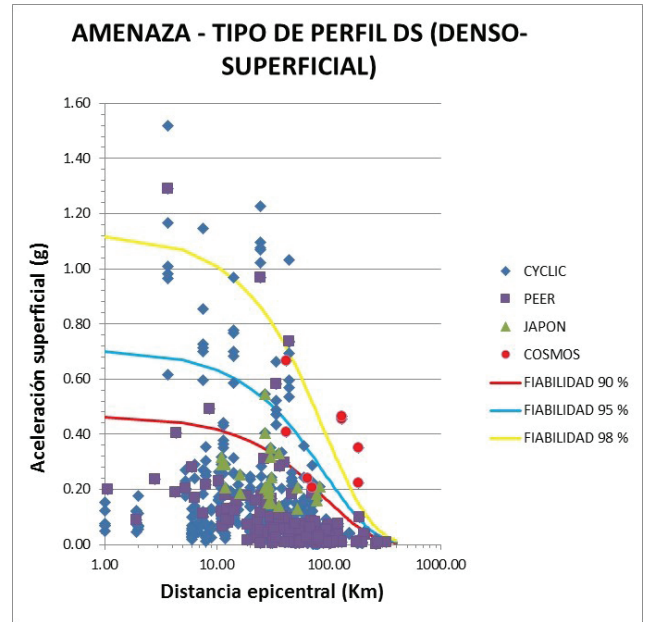
**Figura 6.** Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo SI (suelto o blando de espesor intermedio). Fuente propia



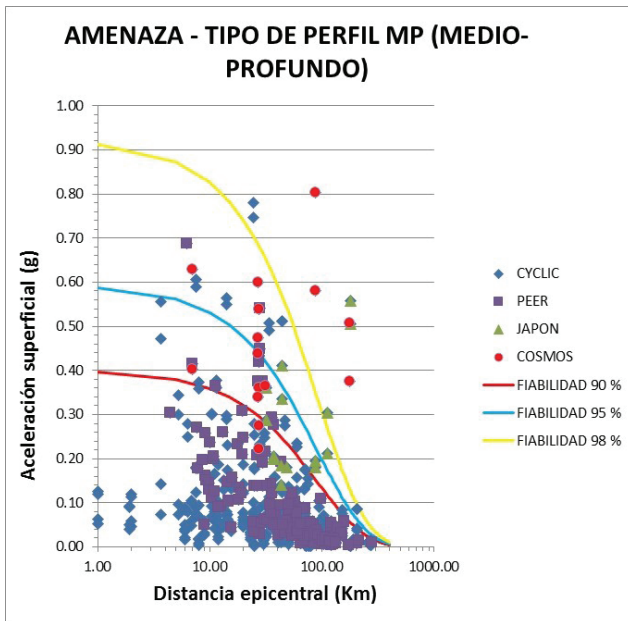
**Figura 8.** Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo MS (de consistencia media-superficial). Fuente propia



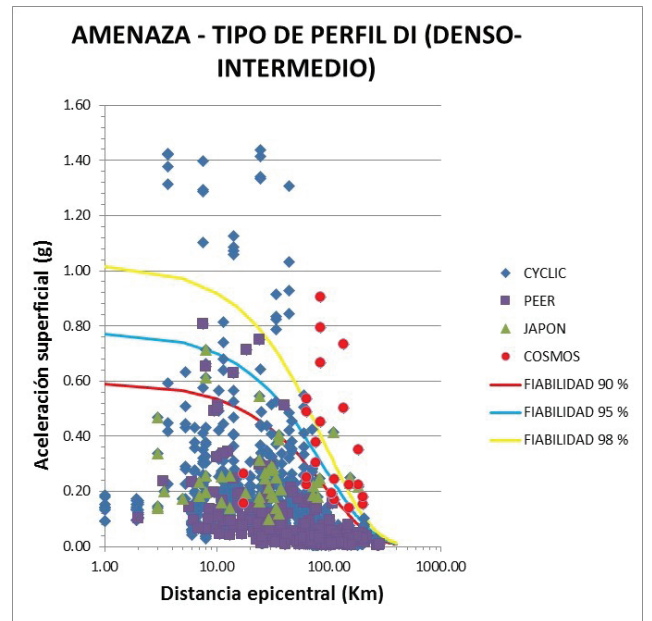
**Figura 9.** Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo MI (de consistencia media-de espesor intermedio). Fuente propia



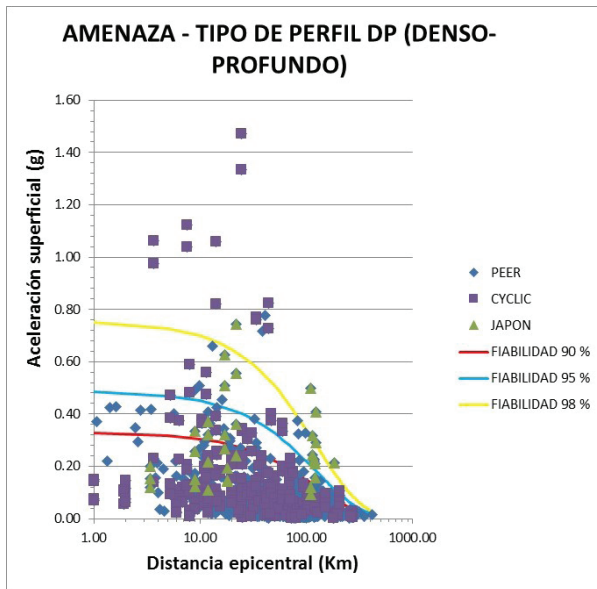
**Figura 11.** Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo DS (de consistencia dura o densa superficial) Fuente propia



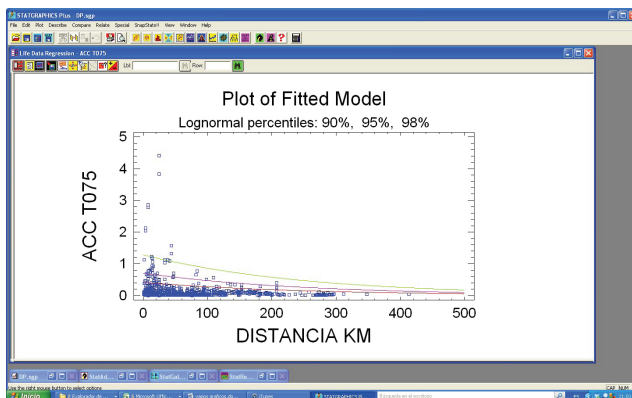
**Figura 10.** Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo MP (de consistencia media-profunda). Fuente propia



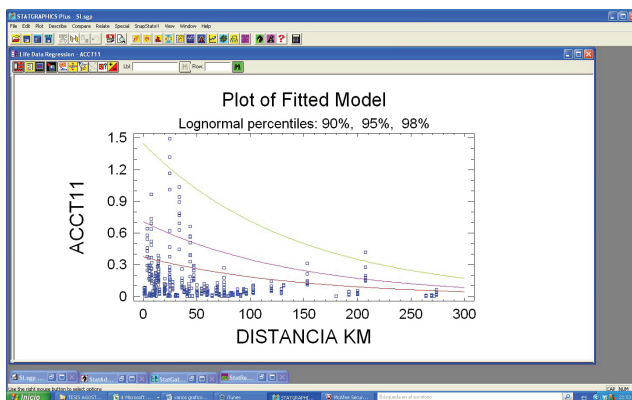
**Figura 12.** Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo DI (de consistencia dura o densa de espesor intermedio). Fuente propia



**Figura 13.** Atenuación de la aceleración superficial con la distancia epicentral para el perfil de suelo DP (de consistencia dura o densa profunda) Fuente propia



**Figura 14.** Ajuste del tipo Lognormal utilizando el programa Statgraphics para niveles de confianza de 90 %, 95 % y 98 % para un periodo de vibración de 0,75 s. Fuente propia



**Figura 15.** Ajuste del tipo Lognormal utilizando el programa Statgraphics para niveles de confianza de 90 %, 95 % y 98 % para un periodo de vibración de 1,1 s. Fuente propia

Para construir el espectro de diseño con riesgo uniforme a partir del mapa de zonificación sísmica, con el perfil caracterizado y conocida la zona sísmica o aceleración (ao), se determina qué distancia epicentral produce ese nivel de aceleración utilizando las Figuras 5 a 13 o la ecuación 1, fijando previamente un nivel de confianza.

Con la distancia epicentral conocida y utilizando los coeficientes que se indican en el anexo se obtienen las ordenadas espectrales por periodos asociadas a ese perfil y para un cierto nivel de confianza predefinido.

Ejemplos de los espectros que se obtendrían aplicando esta metodología han sido reproducidos en el anexo cuando se realizaron comparaciones con la Norma Convenin Venezolana 1756-01. Lo importante por destacar es que en todos los casos estudiados, en el rango de bajos periodos (menores a 0,6 s) se obtienen aceleraciones espectrales que superan los indicados en la norma. El hecho anterior se debe a que generalmente cuando se define el espectro de diseño se corta u omiten los valores picos, a diferencia de como se han obtenido los valores de aceleraciones espectrales, utilizando la metodología propuesta de un análisis de tipo estadístico.

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

Alternativamente a la metodología previamente presentada para generar los espectros de diseño a partir del mapa de zonificación sísmica (ao conocido), se presenta a continuación, un nuevo método, alternativo, para obtener los espectros de diseño si se conoce la sismotectónica propia del lugar de estudio.

Para ello, a fin de generar las ordenadas espectrales con igual probabilidad de ocurrencia 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 cuál es la tasa anual de excedencia (modelo de Poisson, ecuación (2)) y la magnitud de los sismos (Ver Figura 16).

$$P = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

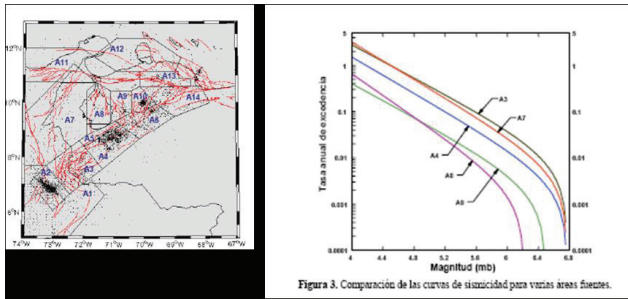
donde:

P: probabilidad de excedencia.

$\lambda$ : Tasa anual de excedencia.

t: Vida útil.





**Figura 16.** 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 finalidad de conocer a profundidad cómo 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 compactación 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.

Seguidamente, 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 2 anexa. Podrían seleccionarse diferentes valores de probabilidades de excedencia y vida útil y calcular la tasa anual de excedencia utilizando el modelo de Poisson (ecuación 2).

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 tomarían 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.

Del paso anterior, se obtendrían curvas similares a las presentadas en las Figuras 5 a 13 que cumplen con la tasa anual de excedencia y el nivel de confianza predefinido.

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 %.

Dichas curvas serían ajustadas a ecuaciones del tipo (1), previamente indicada, que se reproduce a continuación, para mantener la secuencia de la metodología propuesta.

$$a = c_1 * e^{c_2 * x} \quad (1)$$

donde:

a = aceleración espectral (g)

$C_1$  y  $C_2$ : Coeficientes de ajuste.

X: distancia epicentral (Km)

Para obtener los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$  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  $C_1$  y  $C_2$  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, se cuente con la base de datos sismológica de la red mundial y se conozca la tipología de la columna de suelo.

En la medida en que se tenga mayor cantidad de historias de aceleraciones medidas en las estaciones sismológicas donde se conozca su perfil litológico, menor será la cantidad de simulaciones de propagación de ondas requeridas para completar la base de datos.

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.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se ha desarrollado una metodología que permite obtener espectros de diseño con igual probabilidad de ocurrencia para ser aplicados en problemas donde se desea estudiar cómo se comportan las estructuras al ser sometidas a sismos frecuentes, ocasionales, raros y muy raros. Ello permitiría determinar cuáles serían los costos de las técnicas de rehabilitación o reforzamiento que deberían implementarse en una estructura en particular para satisfacer los niveles de ocupación o desempeño esperados.
- La metodología consiste en representar gráficamente la relación entre las aceleraciones espectrales ( $a$ ) y distancias epicentrales ( $x$ ) 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 ( $a$ ).
- 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.
- Las comparaciones realizadas entre los espectros obtenidos de esta investigación y los espectros normativos venezolanos permite concluir que en el rango de bajos períodos (menor a 0,6 s) los valores en las ordenadas espectrales son mayores entre 1,2 a 1,8 veces para un valor de confiabilidad de 90 %, entre 1,1 y 2,3 veces para un valor de confiabilidad de 95 % y entre 1,3 y 3,5 veces para un valor de confiabilidad de 98 %.
- La diferencia entre las ordenadas espectrales normativas venezolanas y las obtenidas en este estudio en el rango de bajos períodos tiende a aumentar con el nivel de confianza prefijado y a menor distancia de las fallas activas.
- 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

transcurrentes de magnitudes menores o iguales a 8.

- 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 productos 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, la apropiada caracterización dinámica del suelo que permita reproducir el comportamiento observado y registros instrumentales de estaciones sismológicas colocadas en este tipo de suelos.
- Se recomienda igualmente para futuras investigaciones incorporar la influencia de varios componentes sísmicos en la generación de los espectros, utilizando algoritmos de cálculo tridimensionales, así como la influencia de tipo topográfico.
- Los resultados aquí obtenidos servirán como guía a la hora de definir espectros de diseño por grado de confiabilidad 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. *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, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL ATC-40 (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. California Seismic Safety Commission, Report SSC-96-01.
- 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. Caracas.
- 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). 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.
- 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. (2007). 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.
- 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.
- 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, Venezuela.
- ELGAMAL, A., YANG Z., PARRA, E. Y DOBRY, R. (1999). Modeling of Liquefaction Induced Shear Deformation. 2nd. International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Lisbon, Portugal.
- 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.
- FEMA, 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, [Disponible: <http://www.funvisis.gob.ve/amenaza.php>], consulta, Julio 2013.
- 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, 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.
- HOUSNER, G. W. (1959). Behavior of Structures During Earthquakes. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 85(EM4), 109–129.
- 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. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, USA.
- LAI, T., ELGAMAL, A., YANG, Z., WILSON, D.W., KUTTER, B.L. (2004). Numerical Modeling of Dynamic Centrifuge Experiments on a Saturated Dense Sand Stratum. 11 Int. Conference on soil Dynamics & Earthquake Engineering, University of California, Berkeley.
- MANUAL DE INGENIERÍA DE DISEÑO PDVSA JA-221 (1999). Diseño sismorresistente de instalaciones industriales. Vol. 18 I, Venezuela.
- A. ELGAMAL, A., YANG, Z., PARRA, E. AND RAGHEB, A. (2013). Manual de usuario Software Cyclic 1-D University of California, San Diego, Department of Structural Engineering.
- MATHWAVE TECHNOLOGIES. (2010). Manual de usuario Software Easyfit Professional 5.4.
- STATISTICAL GRAPHICS CORPORATION.(2001). Manual de usuario Software STATGRAPHICS PLUS 5.
- 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, Construcción Civil, Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio, Caracas.
- NERPH. (1997). Recommended Provisions for Seismic Regulations for new Buildings and Other Structures, Building Seismic Safety Council, FEMA Publication 222A Washington DC.
- NORMA COVENIN 1756-01 (2001). Edificaciones Sismorresistentes. Fondonorma, Funvisis. Caracas, Venezuela.
- 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).
- SEAOC (1995). Recommended Guidelines for the Practice of Structural Engineering in California. Structural Engineers Association of California.
- 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, National 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.
- TORRES, RONALD (2005). Apuntes de clase de la materia problemas especiales: Fiabilidad estructural. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Estudios de Postgrado. Caracas, Venezuela.
- UGAS, C. (1974). Espectros para diseño antisísmico en función de las condiciones locales del suelo. *Boletín técnico IMME*, Vol. 48, Caracas, Venezuela.
- 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.



## ANEXOS

**Tabla 1.** Distribución de registros utilizados para realizar los análisis en este estudio. Fuente propia

Data	PERFIL TÍPICO DE SUELO									
	SS	SI	SP	MS	MI	MP	DS	DI	DP	TOTAL
PEER	-	-	16	-	1	180	150	242	564	1.153
CYCLIC	332	664	332	332	664	332	332	664	332	3.984
JAPON	33	9	4	21	54	15	25	48	34	243
COSMOS					19	15	8	24		66

5.446

**Tabla 2.** Cálculo de la tasa anual de excedencia para diferentes probabilidades de excedencia y vida útil de las estructuras. Fuente propia

SISMO	Probabilidad de excedencia	Vida útil	Período de retorno	Tasa anual de excedencia (N° sísmos/año)
FRECUENTE	50 %	50 años	72 años	0,013
OCASIONAL	20 %	50 años	225 años	0,0044
RARO	10 %	50 años	475 años	0,0021
MUY RARO	2 %	50 años	2.475 años	0,0004

### PERFIL SUELTO SUPERFICIAL (SS)

CONFIABILIDAD DE 90 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,5551	-0,009
0,100	1,2349	-0,011
0,200	1,4966	-0,009
0,300	1,0114	-0,009
0,400	0,8188	-0,009
0,500	0,6278	-0,008
0,600	0,5305	-0,008
0,750	0,3941	-0,008
0,900	0,3087	-0,007
1,000	0,2760	-0,006
1,100	0,2476	-0,006
1,200	0,2297	-0,006
1,300	0,2137	-0,006
1,400	0,1919	-0,006
1,500	0,1652	-0,005
1,600	0,1521	-0,005
1,800	0,1165	-0,005
1,900	0,1105	-0,005
2,000	0,1042	-0,005
2,500	0,0756	-0,004
3,000	0,0568	-0,004
3,500	0,0447	-0,003
4,000	0,0380	-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

**PERFIL SUELTO-INTERMEDIO (SI)**

CONFIABILIDAD DE 90 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,4927	-0,009
0,1	0,934	-0,01
0,2	1,4622	-0,009
0,3	1,3747	-0,009
0,4	1,3336	-0,009
0,5	1,0675	-0,008
0,6	0,8882	-0,008
0,75	0,6289	-0,008
0,9	0,4958	-0,008
1	0,4308	-0,007
1,1	0,3754	-0,007
1,2	0,3429	-0,007
1,3	0,3206	-0,007
1,4	0,2939	-0,007
1,5	0,2405	-0,007
1,6	0,2195	-0,007
1,8	0,1639	-0,006
1,9	0,1525	-0,006
2	0,1425	-0,006
2,5	0,0972	-0,005
3	0,0725	-0,005
3,5	0,0558	-0,005
4	0,0459	-0,004

**PERFIL SUELTO-INTERMEDIO (SI)**

CONFIABILIDAD DE 95 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,7136	-0,009
0,1	1,334	-0,01
0,2	2,2969	-0,009
0,3	2,2691	-0,009
0,4	2,2593	-0,009
0,5	1,8521	-0,008
0,6	1,5808	-0,008
0,75	1,1423	-0,008
0,9	0,9199	-0,008
1	0,8055	-0,007
1,1	0,7088	-0,007
1,2	0,6573	-0,007
1,3	0,6172	-0,007
1,4	0,5526	-0,007
1,5	0,4733	-0,007
1,6	0,432	-0,007
1,8	0,3239	-0,006
1,9	0,3009	-0,006
2	0,2819	-0,006
2,5	0,196	-0,005
3	0,1471	-0,005
3,5	0,1154	-0,005
4	0,0947	-0,004

**PERFIL SUELTO-INTERMEDIO (SI)**

CONFIABILIDAD DE 98 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	1,0808	-0,009
0,1	1,9921	-0,01
0,2	3,8202	-0,009
0,3	3,9883	-0,009
0,4	4,1055	-0,008
0,5	3,4464	-0,008
0,6	3,0368	-0,008
0,75	2,2405	-0,008
0,9	1,8379	-0,008
1	1,627	-0,007
1,1	1,4476	-0,007
1,2	1,3658	-0,007
1,3	1,2904	-0,007
1,4	1,1745	-0,007
1,5	1,0091	-0,007
1,6	0,9251	-0,007
1,8	0,6955	-0,006
1,9	0,6504	-0,006
2	0,6083	-0,006
2,5	0,4326	-0,005
3	0,327	-0,005
3,5	0,26	-0,005
4	0,2144	-0,004

**PERFIL SUELTO-PROFUNDO (SP)**

CONFIABILIDAD DE 90 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,3418	-0,007
0,1	0,5883	-0,009
0,2	0,965	-0,008
0,3	0,9213	-0,007
0,4	0,8067	-0,008
0,5	0,6991	-0,007
0,6	0,6151	-0,007
0,75	0,5521	-0,006
0,9	0,533	-0,006
1	0,4811	-0,006
1,1	0,4312	-0,006
1,2	0,4021	-0,005
1,3	0,3752	-0,005
1,4	0,3273	-0,005
1,5	0,2756	-0,005
1,6	0,2482	-0,005
1,8	0,1795	-0,004
1,9	0,1666	-0,004
2	0,1564	-0,004
2,5	0,1142	-0,003
3	0,0843	-0,003
3,5	0,0676	-0,002
4	0,0561	-0,002

**PERFIL SUELTO-PROFUNDO (SP)**

CONFIABILIDAD DE 95 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,5342	-0,007
0,1	0,9165	-0,009
0,2	1,578	-0,008
0,3	1,5402	-0,007
0,4	1,3664	-0,008
0,5	1,2016	-0,007
0,6	1,0918	-0,007
0,75	1,0094	-0,006
0,9	1,0136	-0,006
1	0,9258	-0,006
1,1	0,844	-0,006
1,2	0,7984	-0,005
1,3	0,748	-0,005
1,4	0,6553	-0,005
1,5	0,555	-0,005
1,6	0,502	-0,005
1,8	0,361	-0,004
1,9	0,3346	-0,004
2	0,3168	-0,004
2,5	0,2363	-0,003
3	0,1765	-0,003
3,5	0,1451	-0,002
4	0,12	-0,002

**PERFIL SUELTO-PROFUNDO (SP)**

CONFIABILIDAD DE 98 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,884	-0,007
0,1	1,5078	-0,009
0,2	2,7532	-0,008
0,3	2,7487	-0,007
0,4	2,4779	-0,008
0,5	2,2116	-0,007
0,6	2,0813	-0,007
0,75	1,9878	-0,006
0,9	2,0871	-0,006
1	1,9388	-0,006
1,1	1,7953	-0,006
1,2	1,7248	-0,005
1,3	1,621	-0,005
1,4	1,4324	-0,005
1,5	1,2248	-0,005
1,6	1,1095	-0,005
1,8	0,7988	-0,004
1,9	0,7358	-0,004
2	0,6988	-0,004
2,5	0,5356	-0,003
3	0,4058	-0,003
3,5	0,3409	-0,002
4	0,2863	-0,002

**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

**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

**PERFIL MEDIO-PROFUNDO (MP)**

CONFIABILIDAD DE 90 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,4008	-0,011
0,1	0,7628	-0,012
0,2	1,0471	-0,011
0,3	0,9897	-0,01
0,4	0,9019	-0,009
0,5	0,8165	-0,01
0,6	0,7411	-0,009
0,75	0,6163	-0,009
0,9	0,5198	-0,008
1	0,4599	-0,008
1,1	0,4405	-0,007
1,2	0,4233	-0,007
1,3	0,3844	-0,007
1,4	0,3528	-0,007
1,5	0,3093	-0,006
1,6	0,2809	-0,006
1,8	0,2322	-0,006
1,9	0,22	-0,006
2	0,2055	-0,006
2,5	0,1574	-0,005
3	0,1027	-0,006
3,5	0,093	-0,003
4	0,0727	-0,003

**PERFIL MEDIO-PROFUNDO (MP)**

CONFIABILIDAD DE 95 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,5931	-0,011
0,1	1,1209	-0,012
0,2	1,6112	-0,011
0,3	1,5701	-0,01
0,4	1,4549	-0,009
0,5	1,3604	-0,009
0,6	1,266	-0,009
0,75	1,0779	-0,009
0,9	0,9245	-0,008
1	0,829	-0,008
1,1	0,8068	-0,007
1,2	0,7848	-0,007
1,3	0,722	-0,007
1,4	0,6654	-0,007
1,5	0,5869	-0,006
1,6	0,5343	-0,006
1,8	0,4447	-0,006
1,9	0,4231	-0,006
2	0,4023	-0,006
2,5	0,3194	-0,005
3	0,243	-0,005
3,5	0,194	-0,005
4	0,1541	-0,005

**PERFIL MEDIO-PROFUNDO (MP)**

CONFIABILIDAD DE 98 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,9218	-0,011
0,1	1,7275	-0,012
0,2	2,6207	-0,011
0,3	2,6341	-0,01
0,4	2,4908	-0,009
0,5	2,419	-0,009
0,6	2,3104	-0,009
0,75	2,0199	-0,009
0,9	1,7677	-0,008
1	1,6107	-0,008
1,1	1,6044	-0,007
1,2	1,5705	-0,007
1,3	1,4657	-0,007
1,4	1,3572	-0,007
1,5	1,2067	-0,006
1,6	1,0982	-0,006
1,8	0,9251	-0,006
1,9	0,8885	-0,006
2	0,8586	-0,006
2,5	0,7039	-0,005
3	0,5472	-0,005
3,5	0,4434	-0,005
4	0,3566	-0,005

**PERFIL DENSO-SUPERFICIAL (DS)**

CONFIABILIDAD DE 90 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,4652	-0,011
0,1	1,0115	-0,013
0,2	0,9821	-0,011
0,3	0,7963	-0,01
0,4	0,7453	-0,01
0,5	0,5955	-0,009
0,6	0,5256	-0,009
0,75	0,407	-0,008
0,9	0,3316	-0,008
1	0,2965	-0,008
1,1	0,2663	-0,007
1,2	0,2457	-0,007
1,3	0,2264	-0,007
1,4	0,2034	-0,007
1,5	0,1782	-0,006
1,6	0,1629	-0,006
1,8	0,1276	-0,006
1,9	0,1187	-0,006
2	0,1107	-0,006
2,5	0,0793	-0,005
3	0,0585	-0,004
3,5	0,0464	-0,004
4	0,0383	-0,003

**PERFIL DENSO-SUPERFICIAL (DS)**

CONFIABILIDAD DE 95 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	0,7059	-0,011
0,1	1,5563	-0,013
0,2	1,5851	-0,011
0,3	1,3327	-0,01
0,4	1,2955	-0,01
0,5	1,0588	-0,009
0,6	0,9615	-0,009
0,75	0,766	-0,008
0,9	0,6361	-0,008
1	0,5716	-0,008
1,1	0,5172	-0,007
1,2	0,4877	-0,007
1,3	0,4525	-0,007
1,4	0,4106	-0,007
1,5	0,3612	-0,006
1,6	0,3302	-0,006
1,8	0,2587	-0,006
1,9	0,2422	-0,006
2	0,2273	-0,006
2,5	0,1656	-0,005
3	0,1243	-0,004
3,5	0,1004	-0,004
4	0,0832	-0,003

**PERFIL DENSO-SUPERFICIAL (DS)**

CONFIABILIDAD DE 98 %

PERIODO (S)	C1	C2
0,001	1,1276	-0,011
0,1	2,5361	-0,013
0,2	2,7151	-0,011
0,3	2,377	-0,01
0,4	2,4147	-0,01
0,5	2,0242	-0,009
0,6	1,8989	-0,009
0,75	1,5577	-0,008
0,9	1,323	-0,008
1	1,2032	-0,008
1,1	1,0992	-0,007
1,2	1,0531	-0,007
1,3	0,9823	-0,007
1,4	0,901	-0,007
1,5	0,7966	-0,006
1,6	0,7306	-0,006
1,8	0,5753	-0,006
1,9	0,5393	-0,006
2	0,5079	-0,006
2,5	0,3812	-0,005
3	0,2907	-0,004
3,5	0,239	-0,004
4	0,199	-0,003



**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

**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

