

ESPECTROS PARA EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO ASOCIADO A LAS FALLAS DE: QUITO Y NANEGALITO

Daissy Quishpe, Magaly Quishpe

**Escuela Politécnica del Ejército
Facultad de Ingeniería Civil**

daissyq@hotmail.com

qmagy@hotmail.com

RESUMEN

El presente estudio de investigación se enfoca en la obtención de espectros para el Distrito Metropolitano de Quito asociado a las principales falla que pueden afectar a la ciudad por su cercanía, como son la falla Quito y la falla de Nanegalito. Los métodos utilizados en este estudio fueron los propuestos por: Abrahamson & Silva y Campbell & Bozorgnia. Además se complementó el estudio al colocar los espectros de diseño CEC 2000 y NEC-11 conjuntamente con los antes mencionados. De manera complementaria a este estudio se presenta la completitud del catálogo sísmico del cual se obtiene las ventanas de tiempo, las mismas que se emplean en el estudio de relación de recurrencia. En la obtención de la Relación de recurrencia se manejaron cuatro métodos: Gutenberg y Richeter, Cornell y Vanmarcke, Wesnousky, Zoller; para la obtención de la magnitud máxima esperada para un sismo raro y ocasional. También se actualizó la microzonificación de los suelos de Quito; teniendo en cuenta las quebradas rellenas y zonas de licuefacción.

Palabras claves.- Completez de la información sísmica, Relación de recurrencia, espectros.

SPECTRUM FOR DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO RELATED TO QUITO AND NANEGALITO FAULTS.

ABSTRACT

The current finding study focuses on the obtaining of spectrums for the Distrito Metropolitano de Quito associated with the main failures that affects the outskirts of the city, as are the Quito and Nanegalito failure. The used means on this study were the ones proposed by: Abrahamson & Silva and Campbell & Bozorgnia. Furthermore it supplemented to the study at setting the spectrums of CEC 2000 and NEC-11 design, jointly with the before mentioned. Of a complementary way to this study it shows the completeness of the sismical catalog of which it gets the time windows, the same as those used in the study of recurrence relation. In the obtaining of the Recurrence Relation it manages four methods: Gutenberg and Richeter, Cornell and Vanmarcke, Wesnousky, Zoller, for the obtention of the expected maximum magnitude for a rare and occasional quake. Also it updated the microzonification of the Quito grounds, having in count the filled ravine and liquefaction zones.

Keywords.- Completez de la información sísmica, Relación de recurrencia, espectros.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las aceleraciones espectrales son los parámetros de la perturbación sísmica que se consideran mejor relacionados con los daños a la posible falla estructural. El espectro de respuesta resulta un medio conveniente para evaluar la fuerza lateral máxima desarrollada en estructuras sujetas a un movimiento dado en la base. Esta constituye la aplicación quizás más importante de los espectros de respuesta, a tal grado que es la base de procedimientos de análisis de empleo muy generalizado. Es un elemento hoy indispensable que los ingenieros deben introducir en sus cálculos.

Por otro lado, ya que la historia en el tiempo de la excitación sísmica en un sitio (sismograma) está caracterizada por el espectro de respuesta correspondiente, las diferencias entre las historias de los movimientos de sitios distintos pueden ser analizadas por la comparación de

sus espectros de respuesta. Otras ventajas son producto del hecho de que los espectros de respuesta pueden suavizarse, promediarse o simplemente modificarse para incluir las condiciones del terreno. El resultado es un espectro suavizado normalizado a un cierto nivel considerado aplicable al diseño.

La definición del espectro de diseño requiere ajustar el espectro suavizado a las diferentes subzonas de la región para la cual es válido, y luego ajustarlo a la estructura que se diseña. Para ajustar a una subzona de la región se usan coeficientes, generalmente empíricos, que caracterizan dicha subzona, a partir de criterios tales como la sismicidad, peligro sísmico, importancia socioeconómica, geología, entre otros. Los coeficientes para ajustar los espectros a las estructuras tienen como criterios el tipo de estructura, su rigidez y ductilidad, las características de los materiales utilizados, el tipo de cimentación, las características de amortiguamiento, la importancia de la estructura inmediatamente después del sismo, etc.

MARCO TEÓRICO

1. SISMICIDAD HISTÓRICA DE QUITO

1.1. Sismos Históricos registrados antes de 1900

En los siguientes párrafos se describe algunos sismos históricos que afectaron a Quito. La información proviene de textos escritos, a consecuencia de los efectos y daños ocasionados, por cada uno de estos sismos.

1.1.1. Sismo de 1541

Es el primer evento del que se posee información en el Catálogo Sísmico del CEINCI-ESPE. Este evento acaeció en provincia de Quijos, en las cercanías del Antisana (Wolf, 1892). Según el CERESIS (1985) la intensidad en sitio fue de IX grados en escala MKS (1964). Por lo que en Quito la intensidad puede haber llegado a VII grados en escala MKS (1964). (Del Pino y Yepes, 1990)

1.1.2. Sismo de 1797

Este sismo ocurrido el 4 de febrero de 1797, alcanzó una intensidad de XI grados MKS (1964), en la zona epicentral alrededor de la ciudad de Riobamba Antigua según el CERESIS (1985). La magnitud inferida es de 8.1, según el NEIC. El epicentro del sismo se localizó aproximadamente a 170km al sur de la ciudad de Quito, donde ocasionó 40 000 muertos. Estudios estiman que en Quito la intensidad fue de VII a VIII grados MKS (1964).

1.1.3. Sismo de 1868

Este sismo acaecido el 16 de agosto de 1868, es más conocido como el sismo de Ibarra. La magnitud inferida por el NEIC fue de $M_w = 7.7$. Este sismo indica, intensidades de hasta X grados MKS. En la Figura 1.2 se puede observar áreas con intensidades de VI, VII, VIII y IX grados MKS.

1.2. Sismos Asociados a fallas Superficiales.

1.2.1. Sismo de 1938

Pese a ser un sismo superficial, no se ha determinado un rasgo geomorfológico que atribuya su origen. Se lo menciona, debido a la expansión urbana de la ciudad de Quito hacia el Valle de los Chillos. El 9 de agosto de 1938, el Observatorio Astronómico registró un sismo de magnitud 7.10 El epicentro fue localizado en las cercanías de Alangasí y El Tingo.

Aproximadamente a 15 Km de la ciudad de Quito. Afectó a Sangolquí, con una intensidad VII en escala MSK.

1.2.2.Sismos de 1998

La población de Quito en 1998 la Ex Defensa Civil no le dio mayor importancia a 12 sismos superficiales con magnitud entre 4 y 5, que se registraron en la ciudad y están asociados a las Fallas de Quito. Algunos autores los consideraron como premonitores de un gran sismo que a lo mejor se registraba. Los sismos registrados en 1998, están asociados a la Falla de Quito, sismos de Subducción que pueden afectar a Quito

1.3. Sismos de Subducción que pueden afectar a Quito

Algunos sismos de subducción cuyo epicentro está localizado a varios kilómetros del Distrito Metropolitano de Quito, pueden llagar a sentirse como son los siguientes sismos:

1.3.1.Sismo de 1942

Éste sismo de subducción ocurrió frente a las costas de Manabí, el 13 de mayo de 1942; con una magnitud de 7.9 a una profundidad focal de 50Km las coordenadas del epicentro indicadas por el NEIC son: latitud -0.01S y longitud -81.12W Su intensidad de VIII, en la escala de Mercalli.

1.3.2.Sismo del 2011

El 24 de agosto del 2011 al sureste de la ciudad de Lima aproximadamente a 540km de ésta, cerca de la ciudad de Pucallpa aconteció un sismo de subducción, de magnitud 6.9 Su epicentro ocurrió a 145,2km de profundidad, según el Centro Sismológico de Estados Unidos. Minutos después del sismo principal se produjo una réplica de magnitud 5.2 grados. Como consecuencia dejó 20 heridos leves en Perú, pero fue sentido en Ecuador, Brasil y Bolivia. En el Ecuador el sismo se sintió, especialmente en edificios altos.

2. COMPLETITUD DE LA INFORMACIÓN SÍSMICA

2.1. Planteamiento del problema.

Para la confección del Catálogo Sísmico del Centro de Investigaciones Científicas, (CEINCI) de la Politécnica del Ejército, (ESPE) se realizó la recopilación de información de los sismos reportados por los catálogos nacionales y extranjeros.. Para cubrir el inconveniente de que la información sísmica no es completa, se presentan dos métodos para encontrar las ventanas de tiempo; el primer método es gráfico y el otro método es el propuesto por Stepp (1973). Los dos métodos consideran los diferentes rangos de magnitud de cada una de las Zonas Fuentes del Ecuador.

2.1.1.Descripción del Método Gráfico

El método consiste en separar los sismos por cada zona fuente. Seguidamente, en cada zona fuente, se separan los sismos por intervalos de magnitud. A continuación, se contabiliza el número de sismos registrados en forma acumulada, por cada año, con respecto al total de sismos de ese intervalo, de tal manera que en el último año el valor vale la unidad. Finalmente en el eje de las abscisas se dibujan el tiempo en años y en el eje de las ordenadas el factor normalizado a la unidad, como máximo.

2.1.2.Aplicación al Catálogo Sísmico del CEINCI-ESPE

Al aplicar el método gráfico a la zona fuente 1 mediante la elaboración de subrutinas en Matlab, se obtuvo la figura mostrada a continuación. En la Figura 2.1 se observa la completitud en el intervalo 4.0 a 4.5 Aplicamos de igual forma el método Gráfico para las 21 zonas fuentes.

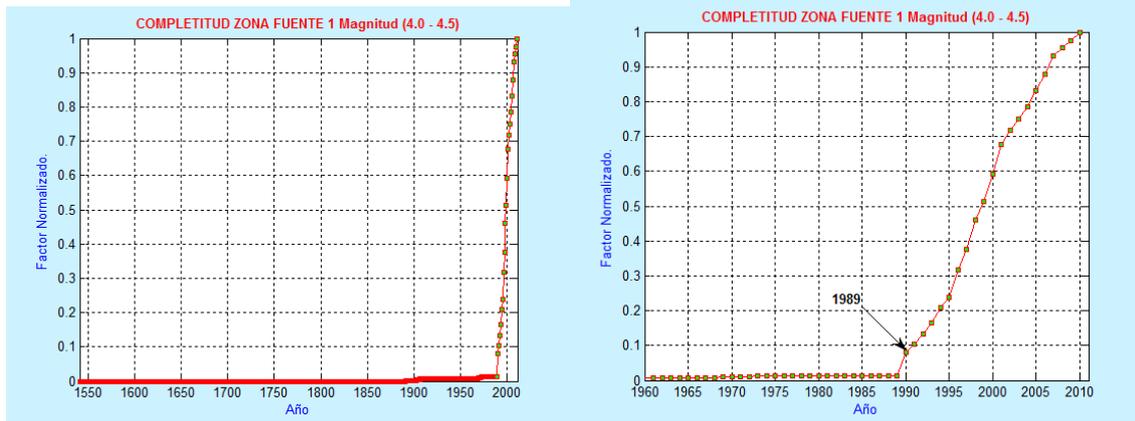


Figura 2.1: Completitud Zona Fuente 1 Magnitud (4.0 – 4.5)

2.2. Método Stepp.

2.2.1. Descripción del Método Stepp

Se agrupa la información sísmica por rangos de magnitudes. Para cada rango de magnitud, se encuentra el número de sismos en diferentes ventanas de tiempo pero empezando siempre por la correspondiente al último año de datos sísmicos. Sea K_i el número total de sismos encontrados en la ventana de tiempo T_i . Por ejemplo, el número de sismos entre 4.0 y 4.5 de magnitud, entre 2009 y 2010 es 20. En este caso K_i es 20 y T_i es 2 años. Se halla la media R_i , la varianza S_R^2 , se encuentra la desviación estándar S_R . Se dibuja el intervalo de tiempo de la ventana con la desviación estándar pero en escala log-log (en base 10). Es $\log(T_i)$ en las abscisas y $\log(S_R)$ en las ordenadas. Se dibuja en la escala log-log la recta $\frac{1}{\sqrt{T_i}}$ y mediante una recta paralela se la lleva hasta encontrar el mejor ajuste que se tiene con los datos dibujados en el paso anterior. En forma visual se determina el rango a partir del cual la muestra es constante.

2.2.2. Aplicación al Catálogo Sísmico CEINCI-ESPE

Al aplicar el Método Stepp a la zona fuente 1 mediante la elaboración de subrutinas en Matlab se obtuvo la figura mostrada a continuación. Aplicamos de igual forma el método de Stepp para las 21 zonas fuentes. En la figura, se dibujó en la parte superior la desviación versus el tiempo en años en escala normal. Mientras que en la parte inferior se dibujó lo anterior en escala logarítmica.

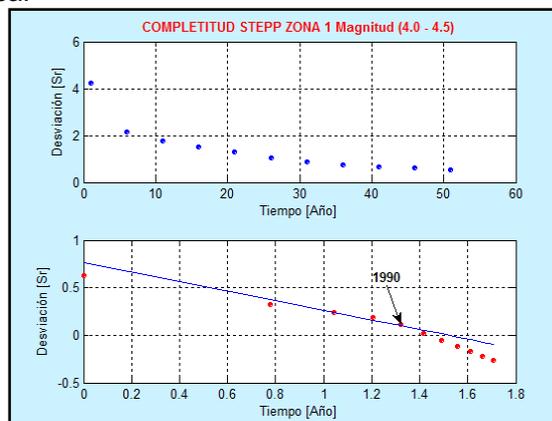


Figura 2.2: Completitud Zona Fuente 1 Magnitud (4.0 – 4.5)

3. RELACIONES DE RECURRENCIA

En cada zona fuente se genera la variación del tamaño de los eventos sísmicos, para conocer ésta variación es necesario establecer la recurrencia sísmica de estas zonas fuentes; donde la recurrencia sísmica simboliza el número de eventos sísmicos mayores o iguales a cierta magnitud dentro de la zona fuente. Para conocer la relación de recurrencia de la actividad sísmica de cada una de las 21 zonas fuentes en estudio, se utilizó los métodos descritos a continuación:

3.1. Relación de Gutenberg y Richter.

La relación de recurrencia de la actividad sísmica, propuesta independientemente por Ishimoto-Ida en 1939 y Gutenberg-Richter en 1944. Tiene la siguiente forma. (Richter, 1958)

$$\log N(M) = a - bM$$

Donde $N(M)$ es el número de sismos con magnitud igual o mayor que M ; a, b son parámetros que se obtienen en cada zona fuente aplicando regresión lineal. (3-1)

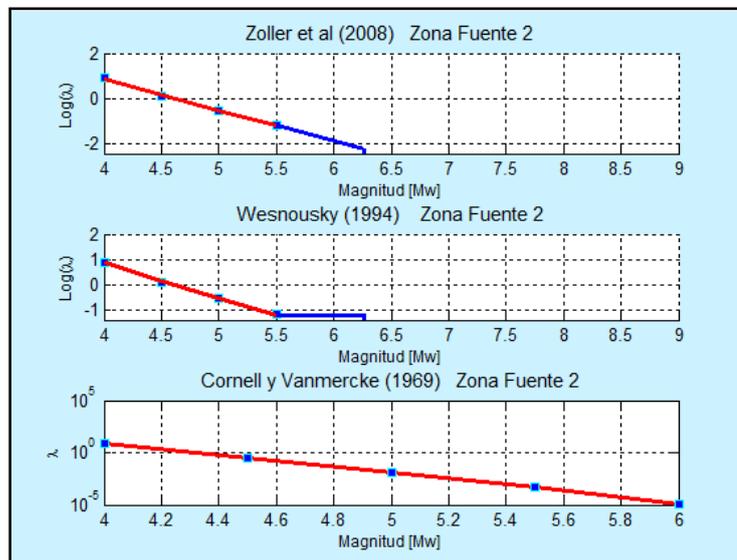


Figura 3.1: Relación de Zöller, Wesnousky, Cornell y Vanmercke aplicado a la Zona Fuente 2

3.2. Relación de Cornell y Vanmarcke.

Cornell y Vanmarcke (1969) presentan un modelo más realista para encontrar $\lambda(M)$:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_U}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_U}} \quad (3-2)$$

La ecuación (3-2) se utiliza en algunos programas para evaluar peligrosidad sísmica, como en el Programa CRISIS, en sus distintas versiones. Ordaz *et al.* (2007), cuando se utiliza la función de distribución de Poisson. Si se dibuja la ecuación (3-2) en papel semilogarítmico se verá que para magnitudes pequeñas es una recta con una pendiente igual a $-\beta$ lo que está en concordancia con lo observado por Gutenberg y Richter (1944); para magnitudes altas la recta se transforma en una curva cóncava hacia abajo y, $\lambda(M) = 0$ para magnitudes mayores a M_U .

3.3. Relación de Wesnousky.

Basa en el criterio a partir de la recta que se obtiene de la ecuación (3-1) se traza una línea horizontal hasta el punto de corte con una recta perpendicular a la magnitud máxima Wesnousky (1994)

3.4. Relación de Zoller.

El modelo utiliza la relación de Gutenberg-Richter para sismos de bajas magnitudes m_{min} o magnitudes intermedias m_{max} . Mientras que para sismos de grandes magnitudes m_m se ajusta haciendo una extrapolación de la recta de Gutenberg-Richter.

4. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS DE QUITO

4.1. Estudio realizado en 2002

En el trabajo realizado por Valverde et al. (2002) se amplía notablemente el área de estudio como se aprecia en la Figura 4.1, y basa su estudio en el trabajo realizado por la EPN et al. (1994) De acuerdo a este estudio no existe perfil de suelos S4. Esto se debe a que no consideraron la presencia de las quebradas, las mismas que en su mayor parte se rellenaron en forma anti técnica y porque piensan que en Quito no hay zonas de licuefacción. Al margen del trabajo presentado por Valverde *et al.* (2002) se puede manifestar que los suelos de Quito son muy resistentes ya que se asientan sobre Cangahua. Únicamente en el Sur de Quito, en el sector de Turubamba los suelos tienen poca resistencia a la compresión a esta zona se la considere como un perfil de suelo tipo S3 como se aprecia en la Figura 4.1.

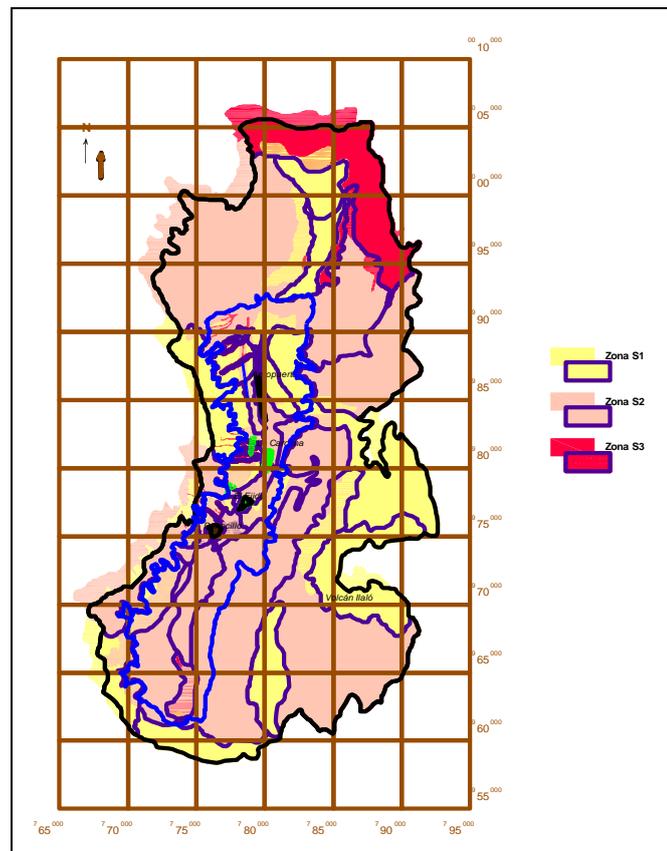


Figura 4.1: Clasificación de los suelos de Quito. Trabajo de Valverde *et al.* (2002)

4.2. Quebradas de Quito.

La mayor parte de las Quebradas que llegan a Quito, provienen del Pichincha y son los cauces por los cuales fluyen las aguas. Con el paso del tiempo estas quebradas han sido rellenadas, no en forma técnica pero, con el paso del tiempo, se han ido consolidando. Es importante conocer los sitios donde se encuentran las quebradas y de acuerdo a la normativa del CEC-2000 corresponden a un suelo tipo S4. Con este antecedente en la Figura 4.6 se presentan las quebradas de Quito, comprendidas entre las latitudes: $99^{\circ}85'00''$ (Aeropuerto) y $99^{\circ}75'00''$ (Panecillo) y entre las longitudes $77^{\circ}5'00''$ y $77^{\circ}3'00''$, con el propósito de visualizar el Centro Norte de Quito.

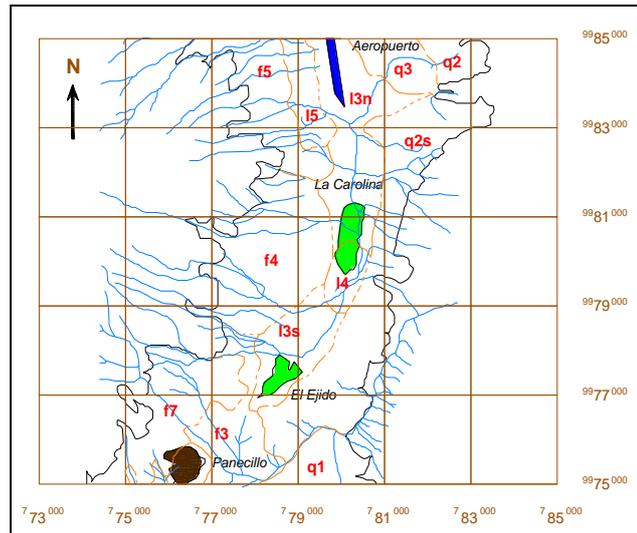


Figura 4.2: Quebradas en el Centro Norte de Quito

4.3. Zonas de Licuefacción.

La licuefacción es considerada como un fenómeno, en el cual por acción de las ondas sísmicas en áreas donde el material granular no consolidado está saturado; se produce la reducción de la resistencia y rigidez del suelo debido al aumento de la presión de poros.

Otra consecuencia de la licuefacción además de los volcamientos, es que los objetos situados bajo tierra, pueden flotar literalmente hacia la superficie, mientras las estructuras superficiales pueden hundirse (Tarbuck y Lutgens, 2000).

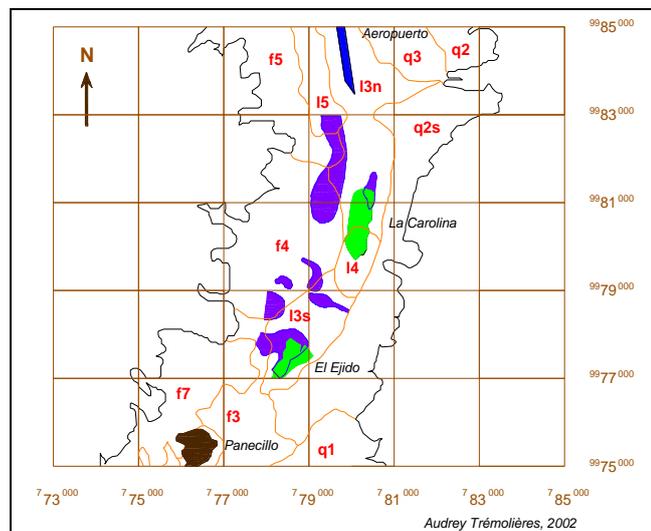


Figura 4.3: Zonas susceptibles a licuefacción e inundaciones. (Trémolières, 2002)

5. FALLAS GEOLÓGICAS QUE PUEDEN AFECTAR A QUITO

5.1. Falla de Quito

Sistema de Fallas **31 a** es una **Falla Inversa con componente Dextral** que tiene un ángulo de buzamiento medio de 60° hacia el Oeste, con una dirección media $N4^{\circ} E \mp 22^{\circ}$; con una tasa de movimiento de 0.2 a 1.0 mm/año y que ha presentado actividad en los últimos 15000 años; la longitud estimada de esta falla es 18.5 Km. Eguez *et al.* (2003).

El sistema de fallas **31 b** es una **Falla Inversa Dextral** con una longitud estimada de 15.7 km.; con un ángulo de buzamiento medio de 60° hacia el Oeste, con una dirección media $N 16^{\circ} E \mp 19^{\circ}$, con una tasa de movimiento de 0.2 a 1.0 mm/año y que ha presentado actividad en los últimos 15000 años. Eguez *et al.* (2003).

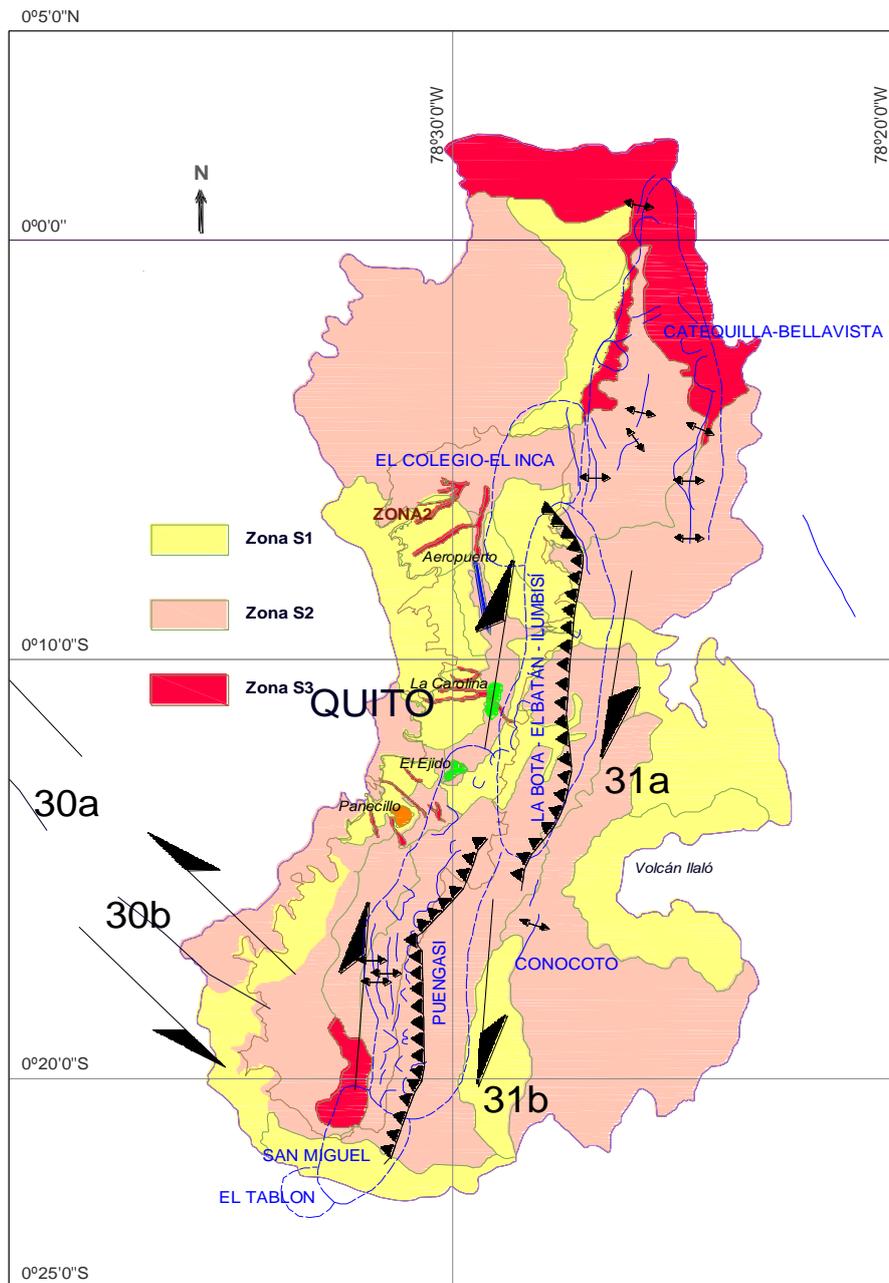


Figura 5.1: Sistema de fallas de Quito y Clasificación de suelos del 2002.

5.2. Falla de Nanegalito.

Está ubicada al Noroeste del Distrito Metropolitano de Quito. Aproximadamente entre las latitudes $0^{\circ}5'0''N$ y $0^{\circ}1'0''S$ y longitudes $78^{\circ}45'0''W$ y $78^{\circ}30'0''W$. Con una longitud de 43.6 Km el movimiento es Dextral. (Eguez *et al.*, 2003) Es una falla activa con un desplazamiento estimado en 1 a 5 mm/año en sentido horizontal y ± 1.5 mm/año en sentido vertical. (Lara *et al.*, 2011)

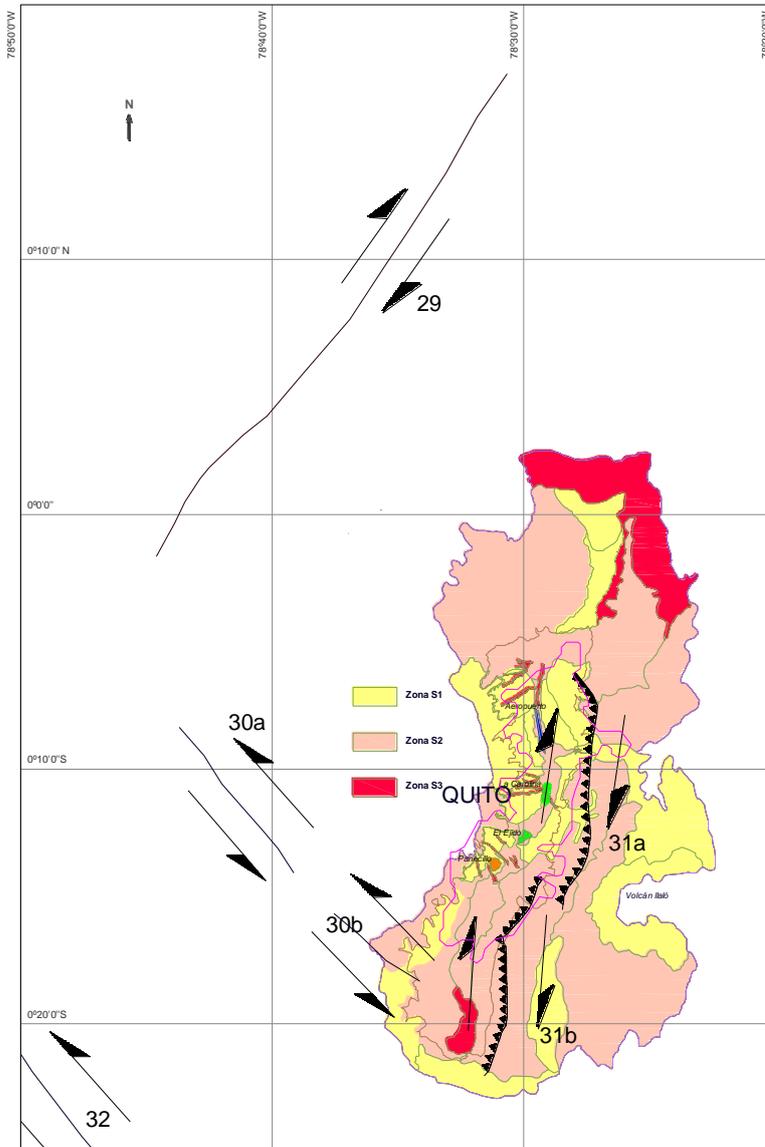


Figura 5.2: Falla Nanegalito 29 y Falla El Cinto 30a y 30b

5. Espectros de Respuesta.

5.1. Método de Abrahamson y Silva.

El rango de aplicabilidad de los modelos empíricos y corrimientos de tierras se basó en el rango cubierto por los datos empíricos disponibles conjunto, sin embargo, en estudios de riesgo, el movimiento del suelo debe ser calculado para todos los terremotos pertinentes, por lo que el límites en el rango de aplicabilidad fueron ignorados con frecuencia. Para solucionar este problema, la próxima generación de atenuación (NGA) proyecto requería que los desarrolladores de los modelos para extrapolar sus modelos de tal manera que son aplicables

a todos los terremotos corteza pertinentes para el análisis de la peligrosidad sísmica local para lo cual debe poseer:

- Magnitudes de 5 a 8,5.
- Distancias de 0 a 200km.
- Períodos espectrales de 0 a 10seg.

El desarrollo de los modelos de redes de próxima generación no es sencillo ajuste de la curva, sino más bien, es la construcción de modelos que utiliza la información sísmológica y geotécnicos, además de los datos empíricos y corrimientos de tierras, para desarrollar los modelos. Los modelos de redes de próxima generación están destinados a iniciar la transición de simples modelos empíricos a la plena simulaciones numéricas para geometrías específicas del lugar de origen.

Incluye todos los terremotos, réplicas de terremotos superficiales en regiones tectónicas activas. El objetivo de este estudio es desarrollar los modelos del movimiento sísmico aplicables a Ecuador, teniendo en cuenta los registros del catálogo CEINCI- ESPE.

La ley de atenuación obtenida es la siguiente:

$$\ln Sa(g) = f_1(M, R_{rup}) + a_{12}F_{RV} + a_{13}F_{NM} + a_{15}F_{AS} + f_5(P\hat{G}A_{1100}, V_{S30}) + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, W, \delta, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_8(R_{rup}, M) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30}) \quad (3)$$

Donde:

- $f_1(M, R_{rup})$ es una función que depende de la magnitud y la distancia

Para $M \leq c_1$

$$f_1(M, R_{rup}) = a_1 + a_4(M - c_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - c_1)] \ln(R) \quad (4)$$

Para $M > c_1$

$$f_1(M, R_{rup}) = a_1 + a_5(M - c_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - c_1)] \ln(R) \quad (5)$$

$$R = \sqrt{R_{rup}^2 + c_4^2} \quad (6)$$

Siendo M la magnitud momento; R_{rup} es la distancia más cercana al plano de ruptura, (ver figura 10); c_1 es una constante de interrupción del rango de magnitud que vale 6.75; c_4 es una profundidad ficticia estimada por regresión para los datos del valor máximo de la aceleración PGA, (ver tabla 5.1); a_1 es un parámetro que define la forma del espectro, está indicado en la tabla 3; a_2 es la distancia de inclinación, estimada por regresión, se indica en la tabla 3; a_3 es un parámetro que se relaciona con la magnitud, (ver tabla 5.1); a_4 es un factor indicado en la tabla 5.1 para magnitud, $M < c_1$; a_5 similar a a_4 pero para magnitud $M \geq c_1$, se indica en la tabla 5.1; a_8 es un factor que afecta a la magnitud al cuadrado y está indicado en la tabla 2.

Tabla 5.1 Períodos-independientes, constantes medias para el movimiento del suelo.

c_1	c_4	a_3	a_4	a_5	N	c	c_2
6.75	4.5	0.265	-0.231	-0.398	1.18	1.88	50

- F_{RV} Variable indicadora que representa fallas inversas e inversas oblicuas con ángulo Rake entre 30 y 150 grados. El ángulo Rake es el ángulo entre la dirección del vector de deslizamiento sobre el plano de falla y el rumbo de la traza de la falla.

En la ecuación (3) se aprecia que F_{RV} está multiplicado por el factor a_{12} el cual se indica en la tabla 5.2. Si no es falla inversa o inversa oblicua el valor de F_{RV} es cero. Caso

contrario vale 1. La falla inversa oblicua es aquella que tiene desplazamiento vertical y horizontal (Inversa-Transcurrente).

Tabla 5.2 Coeficientes para la media del movimiento del suelo con los cuales se halla espectro

Parámetro	V_{LIN}	B	a_1	a_2	a_8	a_{10}	a_{12}	a_{13}
PGA	865.1	-1.186	0.8040	-0.9679	-0.0372	0.9445	0.0000	-0.0600
SaT=0.010	865.1	-1.186	0.8110	-0.9679	-0.0372	0.9445	0.0000	-0.0600
SaT=0.020	865.1	-1.219	0.8550	-0.9774	-0.0372	0.9834	0.0000	-0.0600
SaT=0.030	907.8	-1.273	0.9620	-1.0024	-0.0372	1.0471	0.0000	-0.0600
SaT=0.040	994.5	-1.308	1.0370	-1.0289	-0.0315	1.0884	0.0000	-0.0600
SaT=0.050	1053.5	-1.346	1.1330	-1.0508	-0.0271	1.1333	0.0000	-0.0600
SaT=0.075	1085.7	-1.471	1.3750	-1.0810	-0.0191	1.2808	0.0000	-0.0600
SaT=0.10	1032.5	-1.624	1.5630	-1.0833	-0.0166	1.4613	0.0000	-0.0600
SaT=0.15	877.6	-1.931	1.7160	-1.0357	-0.0254	1.8071	0.0181	-0.0600
SaT=0.20	748.2	-2.188	1.6870	-0.9700	-0.0396	2.0773	0.0309	-0.0600
SaT=0.25	654.3	-2.381	1.6460	-0.9202	-0.0539	2.2794	0.0409	-0.0600
SaT=0.30	587.1	-2.518	1.6010	-0.8974	-0.0656	2.4201	0.0491	-0.0600
SaT=0.40	503.0	-2.657	1.5110	-0.8677	-0.0807	2.5510	0.0619	-0.0600
SaT=0.50	456.6	-2.669	1.3970	-0.8475	-0.0924	2.5395	0.0719	-0.0600
SaT=0.75	410.5	-2.401	1.1370	-0.8206	-0.1137	2.1493	0.0800	-0.0600
SaT=1.0	400.0	-1.955	0.9150	-0.8088	-0.1289	1.5705	0.0800	-0.0600
SaT=1.5	400.0	-1.025	0.5100	-0.7995	-0.1534	0.3991	0.0800	-0.0600
SaT=2.0	400.0	-0.299	0.1920	-0.7960	-0.1708	-0.6072	0.0800	-0.0600
SaT=3.0	400.0	0.0000	-0.280	-0.7960	-0.1954	-0.9600	0.0800	-0.0600
SaT=4.0	400.0	0.0000	-0.639	-0.7960	-0.2128	-0.9600	0.0800	-0.0600
SaT=5.0	400.0	0.0000	-0.936	-0.7960	-0.2263	-0.9208	0.0800	-0.0600
SaT=7.5	400.0	0.0000	-1.527	-0.7960	-0.2509	-0.7700	0.0800	-0.0600
SaT=10.0	400.0	0.0000	-1.993	-0.7960	-0.2683	-0.6630	0.0800	-0.0600
PGV	400.0	-1.955	5.7578	-0.9046	-0.1200	1.5390	0.0800	-0.0600

- F_{NM} Variable indicadora para fallas normales y normales oblicuas con ángulo Rake entre -150^0 y -30^0 . Si es cualquiera de las dos fallas vale 1, caso contrario vale 0. El valor de F_{NM} está multiplicado por el coeficiente a_{13} que está indicado en la tabla 5.2.
- F_{AS} Indicador de una réplica o del evento sísmico principal. Si es réplica vale 1 caso contrario vale 0. Este Indicador está multiplicado por el factor de réplica a_{15} que se indica en la tabla 5.3.
- $f_5(\widehat{PGA}_{1100}, V_{s30})$ Es una función que toma en cuenta las condiciones lineales y no lineales del suelo superficial. Los autores adoptaron el modelo de comportamiento no lineal propuesto por Wallinget *al.* (2008).

Las principales variables involucradas son: \widehat{PGA}_{1100} , que es la aceleración máxima del suelo en roca con $V_{s30} = 1100 \frac{m}{s}$; V_{s30} es la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad del sitio de interés y expresada en m/s.

Para $V_{s30} < V_{LIN}$

$$f_5(P\hat{G}A_{1100}, V_{S30}^*) = a_{10} * \ln\left(\frac{V_{S30}^*}{V_{LIM}}\right) - b * \ln(P\hat{G}A_{1100} + c) + b * \ln\left(P\hat{G}A_{1100} + c \left(\frac{V_{S30}^*}{V_{LIM}}\right)^n\right) \quad (7)$$

Para $V_{S30} \geq V_{LIM}$

$$f_5(P\hat{G}A_{1100}, V_{S30}^*) = a_{10} + b * n * \ln\left(\frac{V_{S30}^*}{V_{LIM}}\right) \quad (8)$$

Donde V_{LIM} es un coeficiente del modelo que depende del período y está indicado en la tabla 5.2; a_{10} coeficiente que depende del período, indicado en la tabla 5.2; b es un parámetro hallado en la simulación no lineal del suelo en una dimensión, en la tabla 5.2; c, n términos de la respuesta no lineal del suelo encontrados en el modelo de una dimensión, está en tabla 5.1;

Para $V_{S30} < V_1$

$$V_{S30}^* = V_{S30}$$

Para $V_{S30} \geq V_1$

$$V_{S30}^* = V_1$$

Para $T \leq 0.50 \text{ seg}$

$$V_1 = 1500 \text{ m/s}$$

Para $0.50 \text{ seg} < T \leq 1.0 \text{ seg}$

$$V_1 = \exp\left[8.0 - 0.795 \ln\left(\frac{T}{0.21}\right)\right]$$

Para $1.0 \text{ seg} < T < 2.0 \text{ seg}$

$$V_1 = \exp[6.76 - 0.297 \ln(T)]$$

Para $T \geq 2.0 \text{ seg}$

$$V_1 = 700 \text{ m/s}$$

Para PGV

$$V_1 = 862 \text{ m/s}$$

Tabla 5.3 Coeficientes para la media del movimiento del suelo.

Parámetro	a14	a15	a16	a18
PGA	1.0800	-0.3500	0.9000	-0.0067
SaT=0.010	1.0800	-0.3500	0.9000	-0.0067
SaT=0.020	1.0800	-0.3500	0.9000	-0.0067
SaT=0.030	1.1331	-0.3500	0.9000	-0.0067
SaT=0.040	1.1708	-0.3500	0.9000	-0.0067
SaT=0.050	1.2000	-0.3500	0.9000	-0.0076
SaT=0.075	1.2000	-0.3500	0.9000	-0.0093
SaT=0.10	1.2000	-0.3500	0.9000	-0.0093
SaT=0.15	1.1683	-0.3500	0.9000	-0.0093
SaT=0.20	1.1274	-0.3500	0.9000	-0.0083
SaT=0.25	1.0956	-0.3500	0.9000	-0.0069
SaT=0.30	1.0697	-0.3500	0.9000	-0.0057
SaT=0.40	1.0288	-0.3500	0.8423	-0.0039
SaT=0.50	0.9971	-0.3191	0.7458	-0.0025
SaT=0.75	0.9395	-0.2629	0.5704	0.0000
SaT=1.0	0.8985	-0.2230	0.4460	0.0000
SaT=1.5	0.8409	-0.1668	0.2707	0.0000
SaT=2.0	0.8000	-0.1270	0.1463	0.0000
SaT=3.0	0.4793	-0.0708	-0.0291	0.0000
SaT=4.0	0.2518	-0.0309	-0.1535	0.0000
SaT=5.0	0.0754	0.0000	-0.2500	0.0000
SaT=7.5	0.0000	0.0000	-0.2500	0.0000
SaT=10.0	0.0000	0.0000	-0.2500	0.0000
PGV	0.7000	-0.3900	0.6300	0.0000

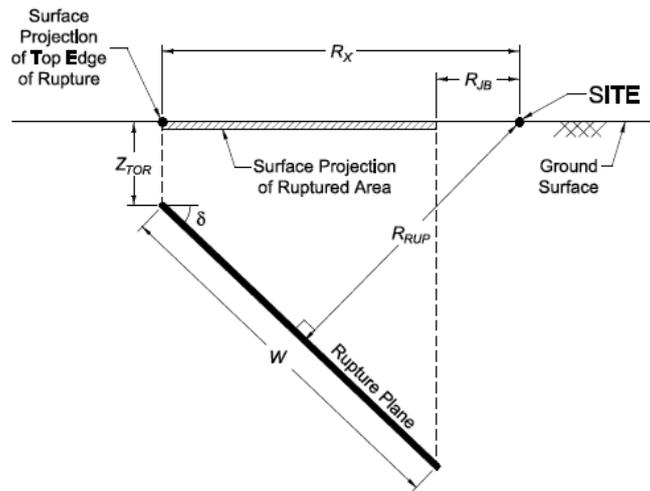


Figura 5.1 Descripción de las variables que intervienen en el modelo.

- $f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, W, \delta, Z_{TOR}, M)$ Es una función que toma en cuenta el efecto de *Hanging Wall*. Antes de describir la función es necesario indicar que la traducción de *Hanging Wall* es: Bloque levantado, Bloque alzado o Bloque Colgante. (PMA 2009). Corresponde a la ladera que está por encima de una falla inclinada. En contraste se tiene lo que se denomina Footwall cuya traducción es Bloque deprimido, Bloque Yacente o Bloque Hundido y corresponde a la ladera por debajo de la falla inclinada. En bloque levantado $F_{HW} = 1$ y si se encuentra en bloque comprimido $F_{HW} = 0$. Si la falla tiene un ángulo de buzamiento $\delta = 90^\circ$ el valor de $F_{HW} = 0$; en la figura 5.1 se identifica el ángulo δ .

Las variables que intervienen en el cálculo están descritas en la figura 5.1 y son: R_{jb} que es la distancia mínima horizontal a la superficie de la proyección de ruptura en km.; R_{rup} que es la distancia más cercana al plano de ruptura en km.; R_x es la distancia horizontal desde el borde de la ruptura al sitio de interés; Z_{TOR} es la profundidad desde el borde de la ruptura. W es la longitud inclinada del ancho de la ruptura; M es el Momento magnitud. Una vez que se han definido las variables citadas, la ecuación de cálculo de la función f_4 viene dada por la (9).

$$f_4(R_{jb}, R_{rup}, \delta, Z_{TOR}, M, W) = a_{14} * T_1 * T_2 * T_3 * T_4 * T_5 \quad (9)$$

Para $R_{jb} < 30 \text{ km}$	$T_1 = 1 - \frac{R_{jb}}{30}$
Para $R_{jb} \geq 30 \text{ km}$	$T_1 = 0$
Para $R_x \leq W \cos(\delta)$	$T_2 = 0.5 + \frac{R_x}{2W \cos(\delta)}$
Para $R_x > W \cos(\delta)$ o $\delta = 90^\circ$	$T_2 = 1$
Para $R_x \geq Z_{TOR}$	$T_3 = 1$
Para $R_x < Z_{TOR}$	$T_3 = \frac{R_x}{Z_{TOR}}$
Para $M \leq 6$	$T_4 = 0$
Para $6 < M < 7$	$T_4 = M - 6$
Para $M \geq 7$	$T_4 = 1$
Para $\delta \geq 70$	$T_5 = 1.0 - \frac{\delta - 70}{20}$
Para $\delta < 70$	$T_5 = 1$

El factor a_{14} está indicad en la tabla 3 y ha sido obtenido por regresión.

- $f_6(Z_{TOR})$ Factor que toma en cuenta la profundidad desde el borde hasta la cima, ver figura 13. La ecuación de cálculo es:

Para $Z_{TOR} < 10 \text{ km}$

$$f_6(Z_{TOR}) = \frac{a_{16} * Z_{TOR}}{10} \quad (10)$$

Para $Z_{TOR} \geq 10 \text{ km}$

$$f_6(Z_{TOR}) = a_{16} \quad (11)$$

Donde a_{16} es el factor de amplificación de la profundidad hasta la cima, hallado por regresión (ver tabla 5.3). El valor de Z_{TOR} se indica en km.

- $f_8(R_{rup}, M)$, es una función de escalamiento para grandes distancias a la falla.

Para $R_{rup} < 100 \text{ km}$

$$f_8(R_{rup}, M) = 0 \quad (12)$$

Para $R_{rup} \geq 100 \text{ km}$

$$f_8(R_{rup}, M) = a_{18}(R_{rup} - 100)T_6 \quad (13)$$

Para $M < 5.5$	$T_6 = 1$
Para $5.5 < M < 6.5$	$T_6 = 0.5(6.5 - M) + 0.5$
Para $M > 6.5$	$T_6 = 0.5$

Donde a_{18} es el factor de escalamiento definido en la tabla 5.3.

- $f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30})$ Es un factor que toma en cuenta el tipo de suelo del sitio de interés. Donde $Z_{1.0}$ es la profundidad en la cual se tiene una velocidad de onda de corte de $V_s = 1000 \text{ m/s}$; V_{S30} es la velocidad media en los primeros 30 m., de profundidad.

Para $Z_{1.0} \geq 200$

$$f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30}) = a_{21} \ln\left(\frac{Z_{1.0} + c_2}{\hat{Z}_{1.0}(V_{S30}) + c_2}\right) + a_{22} \ln\left(\frac{Z_{1.0}}{200}\right) \quad (14)$$

Para $Z_{1.0} < 200$

$$f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30}) = a_{21} \ln\left(\frac{Z_{1.0} + c_2}{\hat{Z}_{1.0}(V_{S30}) + c_2}\right) \quad (15)$$

Para $V_{S30} < 180 \text{ m/s}$	$\ln(\hat{Z}_{1.0}(V_{S30})) = 6.745$
Para $180 \text{ m/s} \leq V_{S30} \leq 500 \text{ m/s}$	$\ln(\hat{Z}_{1.0}(V_{S30})) = 6.745 - 1.35 \ln\left(\frac{V_{S30}}{180}\right)$
Para $V_{S30} > 500 \text{ m/s}$	$\ln(\hat{Z}_{1.0}(V_{S30})) = 5.394 - 4.48 \ln\left(\frac{V_{S30}}{500}\right)$
Para $T < 0.35 \text{ seg}$ o $V_{S30} > 1000$	$e_2 = 0$
Para $0.35 \text{ seg} \leq T \leq 2.0 \text{ seg}$	$e_2 = -0.25 \ln\left(\frac{V_{S30}}{1000}\right) \ln\left(\frac{T}{0.35}\right)$
Para $T > 2.0 \text{ seg}$	$e_2 = -0.25 \ln\left(\frac{V_{S30}}{1000}\right) \ln\left(\frac{2}{0.35}\right)$
Para $V_{S30} \geq 1000 \text{ m/s}$	$a_{21} = 0$
Para $(a_{10} + b * n) \ln\left(\frac{V_{S30}}{\min(V_1, 1000)}\right) + e_2 \ln\left(\frac{Z_{1.0} + c_2}{\hat{Z}_{1.0}(V_{S30}) + c_2}\right) < 0$	$a_{21} = \frac{-(a_{10} + b * n) \ln\left(\frac{V_{S30}}{\min(V_1, 1000)}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{1.0} + c_2}{\hat{Z}_{1.0}(V_{S30}) + c_2}\right)}$
Cualquier otro caso	$a_{21} = e_2$
Para $T < 2.0 \text{ seg}$	$a_{22} = 0$
Para $T \geq 2.0 \text{ seg}$	$a_{22} = 0.0625(T - 2)$

Donde a_{21} es el factor de amplificación de la profundidad, en suelo poco profundo. Limitado por la simulación 1-D del sitio; a_{22} es el factor de ampliación de profundidad, en suelo profundo. Limitado por 3-D cuenca de simulación; c_2 es el término de escalamiento de la profundidad, suelo poco profundo. Ver Tabla 5.1.

5.2. Trabajo de Campbell y Bozorgnia

El trabajo de C-B (2008) trabaja solo con los registros del evento principal de la base de datos de A-S (2008). De tal manera que cuando se quiera generar el espectro debido a una réplica se debe utilizar las ecuaciones de A-S; para generar el espectro de un evento principal,

como en el presente estudio, se puede utilizar las ecuaciones de A-S o las de C-B. La ecuación propuesta por C-B, es la siguiente:

$$\ln Sa(g) = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{set} \quad (16)$$

- f_{mag} Es la función dependiente de la magnitud está dada por:

$$f_{mag} = \begin{cases} c_0 + c_1 * M & M \leq 5.5 \\ c_0 + c_1 * M + c_2 * (M - 5.5) & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_0 + c_1 * M + c_2 * (M - 5.5) + c_3 * (M - 6.5) & M > 6.5 \end{cases} \quad (17)$$

Donde los coeficientes c_0, c_1, c_2, c_3 fueron hallados por regresión y están indicados en la tabla 6. M es el momento magnitud.

- f_{dis} , es la función dependiente de la distancia de la fuente al sitio que viene dada por:

$$f_{dis} = (c_4 + c_5 * M) \ln(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_6^2}) \quad (18)$$

Donde los coeficientes c_4, c_5, c_6 son los indicados en la tabla 4. En la figura 10 se indica en forma gráfica el significado de R_{RUP}

- f_{flt} , es la función dependiente del tipo de falla y viene dado por:

$$f_{flt} = c_7 * F_{RV} * f_{flt,Z} + c_8 * F_{NM} \quad (19)$$

Los coeficientes c_7, c_8 están en la tabla 4. La variable indicadora $F_{RV} = 1$ para fallas inversas e inversas oblicuas (inversa transcurrente) con ángulo Rake entre 30° y 150° ; para otro tipo de falla vale 0.

Por otro lado la variable indicadora $F_{NM} = 1$ para fallas normales y normales oblicuas (normal transcurrente) con ángulo Rake entre -150° y -30° .

El ángulo rake (λ) es una variable continua que representa el ángulo entre la dirección del vector deslizamiento sobre el plano de falla y el rumbo de la traza de la falla.

Donde $f_{flt,Z}$ se obtiene de la siguiente condición.

$$f_{flt,Z} = \begin{cases} Z_{TOR}; Z_{TOR} < 1 \\ 1; Z_{TOR} \geq 1 \end{cases} \quad (20)$$

- f_{hng} , la función dependiente del efecto *hangingwall* y está dada por:

$$f_{hng} = c_9 * f_{hng,R} * f_{hng,M} * f_{hng,Z} * f_{hng,\delta} \quad (21)$$

$$f_{hng,R} = \begin{cases} 1; & R_{JB} = 0 \\ \left[\max(R_{RUP}, \sqrt{R_{JB}^2 + 1}) - R_{JB} \right] / \max(R_{RUP}, \sqrt{R_{JB}^2 + 1}) & R_{JB} > 0, Z_{TOR} < 1 \\ (R_{RUP} - R_{JB}) / R_{RUP}; & R_{JB} > 0, Z_{TOR} \geq 1 \end{cases}$$

$$f_{hng,M} = \begin{cases} 0; & \Rightarrow M \leq 6.0 \\ 2(M - 6.0) & \Rightarrow 6.0 < M < 6.5 \\ 1; & \Rightarrow M \geq 6.5 \end{cases} \quad (22)$$

$$f_{hng,Z} = \begin{cases} 0; & \Rightarrow Z_{TOR} \geq 20 \\ (20 - Z_{TOR}/20) & \Rightarrow 0 \leq Z_{TOR} < 20 \end{cases} \quad (24)$$

$$f_{hng,\delta} = \begin{cases} 1; & \Rightarrow \delta \leq 70 \\ (90 - \delta/20) & \Rightarrow \delta > 70 \end{cases} \quad (25)$$

- f_{site} , la función dependiente de las condiciones lineales y no lineales del suelo superficial y viene dada por:

$$f_{site} = \begin{cases} c_{10} \ln(V_{S30}/K_1) + K_2 \{ \ln[A_{1100} + c(V_{S30}/K_1)^n] - \ln[A_{1100} + c] \} & \Rightarrow V_{S30} < K_1 \\ (c_{10} + K_2 n) \ln(V_{S30}/K_1) & \Rightarrow K_1 \leq V_{S30} \leq 1100 \\ (c_{10} + K_2 n) \ln[1100/K_1] & \Rightarrow V_{S30} \geq 1100 \end{cases} \quad (26)$$

Donde los coeficientes c_{10}, k_1, k_2, c están indicados en la tabla 5. A_{1100} , es la aceleración máxima del suelo sobre roca con $V_s = 1100$ m/s. Finalmente V_{s30} es la velocidad media de la onda de corte a los 30 m.

- $f_{sed.}$. La función es dependiente del sedimento superficial y efecto de cuenca 3D y está dada por:

$$f_{sed} = \begin{cases} c_{11}(Z_{25} - 1); & \Rightarrow Z_{25} < 1 \\ 0; & \Rightarrow 1 \leq Z_{25} \leq 3 \\ c_{12}K_3 e^{-0.75} [1 - e^{-0.25(Z_{25}-3)}] & \Rightarrow Z_{25} > 3 \end{cases} \quad (27)$$

Tabla 5.4 Coeficientes para calcular funciones de magnitud, distancia y de tipo de falla.

T (s)	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
0.010	-1,715	0,500	-0,530	-0,262	-2,118	0,170	5,60	0,280	-0,120	0,490
0.020	-1,680	0,500	-0,530	-0,262	-2,123	0,170	5,60	0,280	-0,120	0,490
0,030	-1,552	0,500	-0,530	-0,262	-2,145	0,170	5,60	0,280	-0,120	0,490
0,050	-1,209	0,500	-0,530	-0,267	-2,199	0,170	5,74	0,280	-0,120	0,490
0,075	-0,657	0,500	-0,530	-0,302	-2,277	0,170	7,09	0,280	-0,120	0,490
0,10	-0,314	0,500	-0,530	-0,324	-2,318	0,170	8,05	0,280	-0,099	0,490
0,15	-0,133	0,500	-0,530	-0,339	-2,309	0,170	8,79	0,280	-0,048	0,490
0,20	-0,486	0,500	-0,446	-0,398	-2,220	0,170	7,60	0,280	-0,012	0,490
0,25	-0,890	0,500	-0,362	-0,458	-2,146	0,170	6,58	0,280	0,000	0,490
0,30	-1,171	0,500	-0,294	-0,511	-2,095	0,170	6,04	0,280	0,000	0,490
0,40	-1,466	0,500	-0,186	-0,592	-2,066	0,170	5,30	0,280	0,000	0,490
0,50	-2,569	0,656	-0,304	-0,536	-2,041	0,170	4,73	0,280	0,000	0,490
0,75	-4,844	0,972	-0,578	-0,406	-2,000	0,170	4,00	0,280	0,000	0,490
1,0	-6,406	1,196	-0,772	-0,314	-2,000	0,170	4,00	0,255	0,000	0,490
1,5	-8,692	1,513	-1,046	-0,185	-2,000	0,170	4,00	0,161	0,000	0,490
2,0	-9,701	1,600	-0,978	-0,236	-2,000	0,170	4,00	0,094	0,000	0,371
3,0	-10,556	1,600	-0,638	-0,491	-2,000	0,170	4,00	0,000	0,000	0,154
4,0	-11,212	1,600	-0,316	-0,770	-2,000	0,170	4,00	0,000	0,000	0,000
5,0	-11,684	1,600	-0,070	-0,986	-2,000	0,170	4,00	0,000	0,000	0,000
7,5	-12,505	1,600	-0,070	-0,656	-2,000	0,170	4,00	0,000	0,000	0,000
10,0	-13,087	1,600	-0,070	-0,422	-2,000	0,170	4,00	0,000	0,000	0,000
PGA	-1,715	0,500	-0,530	-0,262	-2,118	0,170	5,60	0,280	-0,120	0,490
PGV	0,954	0,696	-0,309	-0,019	-2,016	0,170	4,00	0,245	0,000	0,358
PGD	-5,270	1,600	-0,070	0,000	-2,000	0,170	4,00	0,000	0,000	0,000

Tabla 5.5 Coeficientes para función de: sitio y sedimento

T (s)	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	k ₁	k ₂	k ₃	c	n
0.010	1,058	0,040	0,610	865	-1,186	1,839	1,88	1,18
0.020	1,102	0,040	0,610	865	-1,219	1,840	1,88	1,18
0,030	1,174	0,040	0,610	908	-1,273	1,841	1,88	1,18
0,050	1,272	0,040	0,610	1054	-1,346	1,843	1,88	1,18
0,075	1,438	0,040	0,610	1086	-1,471	1,845	1,88	1,18
0,10	1,604	0,040	0,610	1032	-1,624	1,847	1,88	1,18
0,15	1,928	0,040	0,610	878	-1,931	1,852	1,88	1,18
0,20	2,194	0,040	0,610	748	-2,188	1,856	1,88	1,18

0,25	2,351	0,040	0,700	654	-2,381	1,861	1,88	1,18
0,30	2,460	0,040	0,750	587	-2,518	1,865	1,88	1,18
0,40	2,587	0,040	0,850	503	-2,657	1,874	1,88	1,18
0,50	2,544	0,040	0,883	457	-2,669	1,883	1,88	1,18
0,75	2,133	0,077	1,000	410	-2,401	1,906	1,88	1,18
1,0	1,571	0,150	1,000	400	-1,955	1,929	1,88	1,18
1,5	0,406	0,253	1,000	400	-1,025	1,974	1,88	1,18
2,0	-0,456	0,300	1,000	400	-0,299	2,019	1,88	1,18
3,0	-0,820	0,300	1,000	400	0,000	2,110	1,88	1,18
4,0	-0,820	0,300	1,000	400	0,000	2,200	1,88	1,18
5,0	-0,820	0,300	1,000	400	0,000	2,291	1,88	1,18
7,5	-0,820	0,300	1,000	400	0,000	2,517	1,88	1,18
10,0	-0,820	0,300	1,000	400	0,000	2,744	1,88	1,18
PGA	1,058	0,040	0,610	865	-1,186	1,839	1,88	1,18
PGV	1,694	0,092	1,000	400	-1,955	1,929	1,88	1,18
PGD	-0,820	0,300	1,000	400	0,000	2,744	1,88	1,18

En la ecuación (3) o en la ecuación (16) en lugar de $Sa(g)$ se podría haber escrito \check{Y} . En esta caso $\ln \check{Y}$ puede representar el logaritmo natural de la media geométrica de la aceleración máxima horizontal del suelo (PGA) en unidades de g , de la máxima velocidad horizontal del suelo (PGV) en cm/s , del máximo desplazamiento horizontal del suelo (PGD) en cm , o el espectro de pseudo-aceleración absoluta horizontal para el 5% de amortiguamiento (Sa en unidades de g). Todos estos términos expresados en término de la media geométrica según Boore et al. (2006).

La validez del modelo contempla límites en los valores que toman las variables predictivas, en este caso los límites están dados en la Tabla 5.6. Frau (2009)

Tabla 5.6 Valores límites de las variables predictivas en el modelo Campbell y Bozorgnia

Variable Predictiva	Limite de Aplicación	Observaciones
Magnitud	4.0 a 8.5	Fallas transcurrentes
	4.0 a 8.0	Fallas inversas
	4.0 a 7.5	Fallas Normales
Distancia al plano de ruptura	0 a 200 km	R_{rup} ó r_{rup}
Velocidad de onda de Corte	180 a 1500 m/s	V_{S30} NEHRP B,C y D
Profundidad. al techo de la ruptura.	0 a 20 km	Z_{TOR}
Profundidad horizonte a la roca	0 a 6 km	$Z_{2.5}$
Inclinación al plano de falla	15° a 90°	□

Tanto en el trabajo de (A-S), como en el de (C-B) se debe encontrar en primer lugar el PGA sobre roca para un valor de $V_s = 1100 m/s$. Para el modelo de (A-S) se deben utilizar los factores indicados en la primera fila de las tablas 5.2 y 5.3. Para el modelo de (C-B) están en las tablas 5.4 y 5.5 para $T = 0$.

ESPECTROS DEL CEC-2000

El **espectro de diseño elástico** del CEC-2000 que está definido por las siguientes ecuaciones:

$$T < T^* \quad A_d = \alpha \beta A_o \quad (28)$$

$$T^* < T < T^+ \quad A_d = \frac{1.25 \alpha A_o S^s}{T} \quad (29)$$

$$T > T^+ \quad A_d = \frac{\alpha A_o}{2} \quad (30)$$

Donde α es el coeficiente de importancia de la estructura; β , T^* , T^+ , S parámetros que están indicados en la tabla 5.7 y que dependen del perfil de suelo. A_0 es la aceleración máxima del suelo y está definido en el mapa de peligrosidad sísmica del Ecuador, T es el período de vibración de la estructura. Para Quito $A_0 = 0.4 g$; este es el valor de A_0 para un período de retorno de 475 años (50 años de vida útil con 10% de probabilidad de excedencia).

Si se considera $\alpha = 1$, se mantiene la probabilidad de excedencia, este valor se recomienda para viviendas y oficinas. Para edificaciones esenciales, como hospitales, centros de educación se debe trabajar con $\alpha = 1.5$, en este caso la probabilidad de excedencia está alrededor de 2 %.

Tabla 5.7 Parámetros que definen el espectro elástico del CEC-2000

Perfil de suelo	T^* (s)	T^+ (s)	β	S
S1	0.50	2.50	2.5	1.0
S2	0.52	3.11	3.0	1.2
S3	0.82	4.59	2.8	1.5
S4	2.00	10.00	2.5	2.0

Para un período de retorno de 72 años (50 años de vida útil y 50% de probabilidad de excedencia). Aguiar (2003) recomienda encontrar en primer lugar el espectro asociado al *sismo frecuente* (47 años de período de retorno) dividiendo las ordenadas del espectro elástico para 475 años para 3.

Una vez que se obtiene el espectro para el sismo frecuente, se determina el espectro para el *sismo ocasional* (72 años de período de retorno) multiplicando estos valores por 1.4.

5.3. ESPECTROS ASOCIADOS A LAS FALLAS DE QUITO

Alvarado (2011) manifiesta que el ancho de ruptura de la falla de Quito, es variable con un ancho promedio de 10 km., en el plano horizontal se tiene 7 km., de ancho. En la figura 5.2 se ha denominado **Zona 1** al área que está sobre el ancho de ruptura de la falla de Quito y **Zona 2** las áreas adyacentes.

5.4. RESULTADOS PARA PERÍODO DE RETORNO DE 475 AÑOS

Se presentan espectros para el Hanging Wall y para el Foot Wall, cuya explicación se presentó en la figura 11. La mayor parte de construcciones de Quito se hallan en el Hanging Wall.

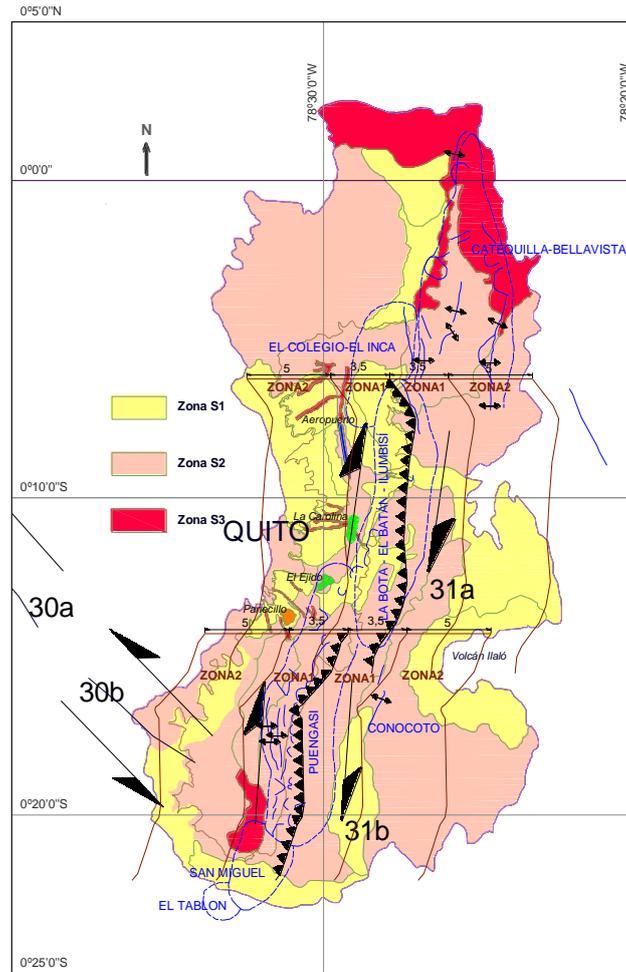


Figura 5.2 Área que se encuentra sobre la falla de Quito S_0

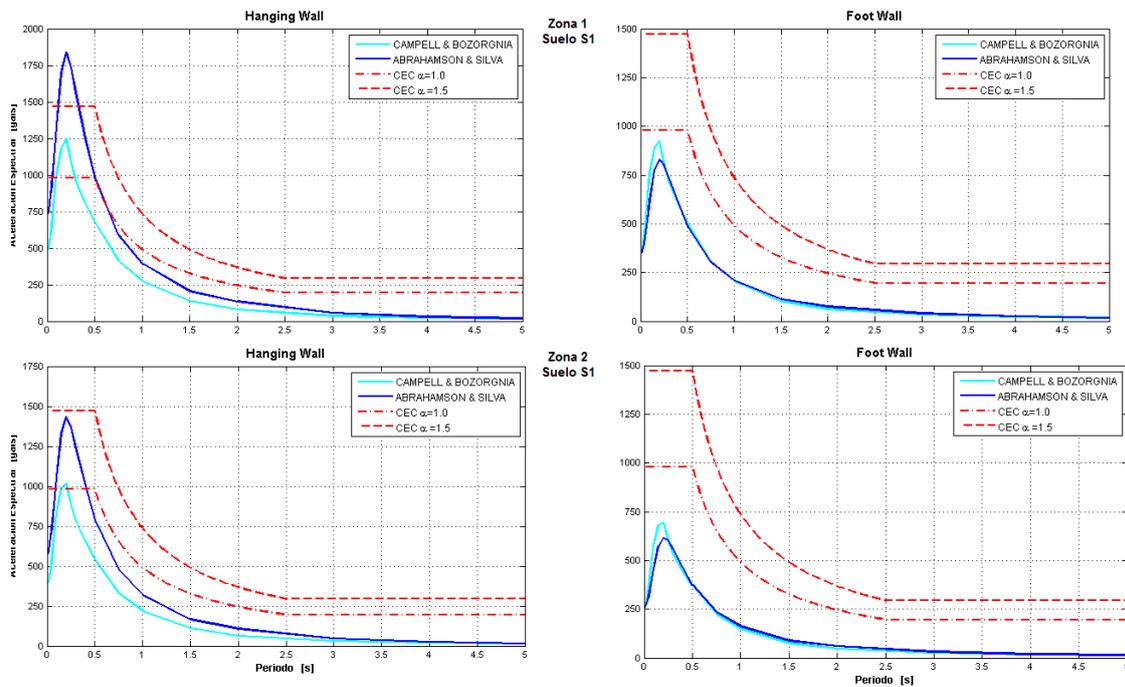


Figura 5.3 Espectros para perfil de suelo S1. Período de retorno 475 años.

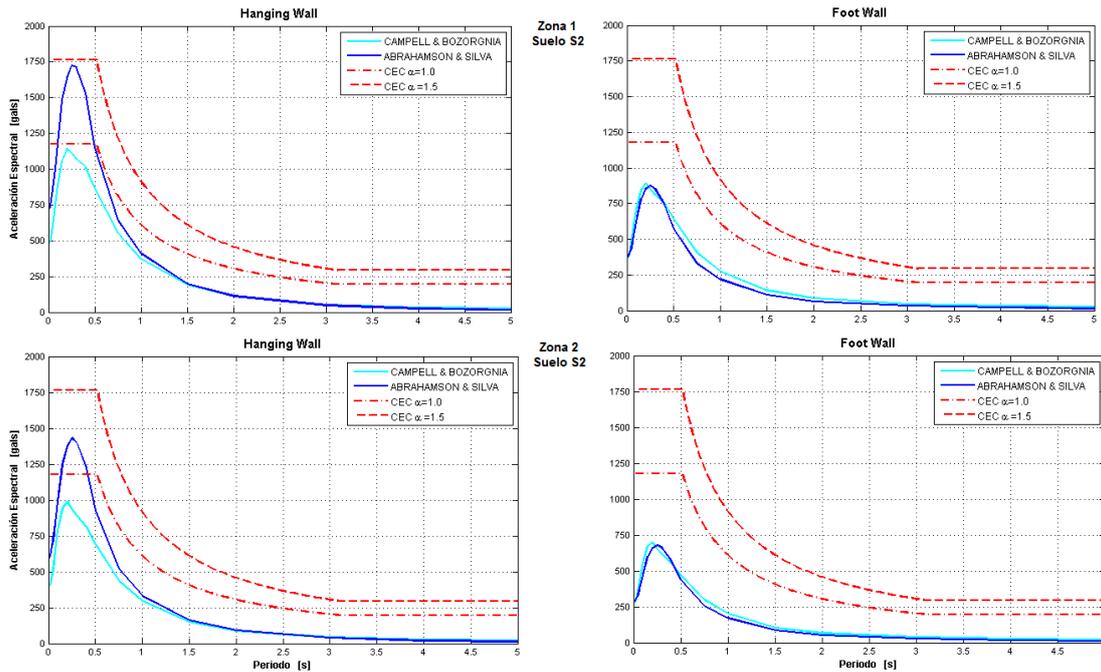


Figura 5.4 Espectros para perfil de suelo S2. Período de retorno 475 años.

La figura 5.3 corresponde a los espectros hallados para un perfil de suelo S1; la 16 para perfil de suelo S2; la 17 para suelos cohesivos S3 y la 18 para suelos granulares S3. Los espectros que se hallan en la parte superior de cada figura son para la Zona 1 y los de la parte inferior para zona 2.

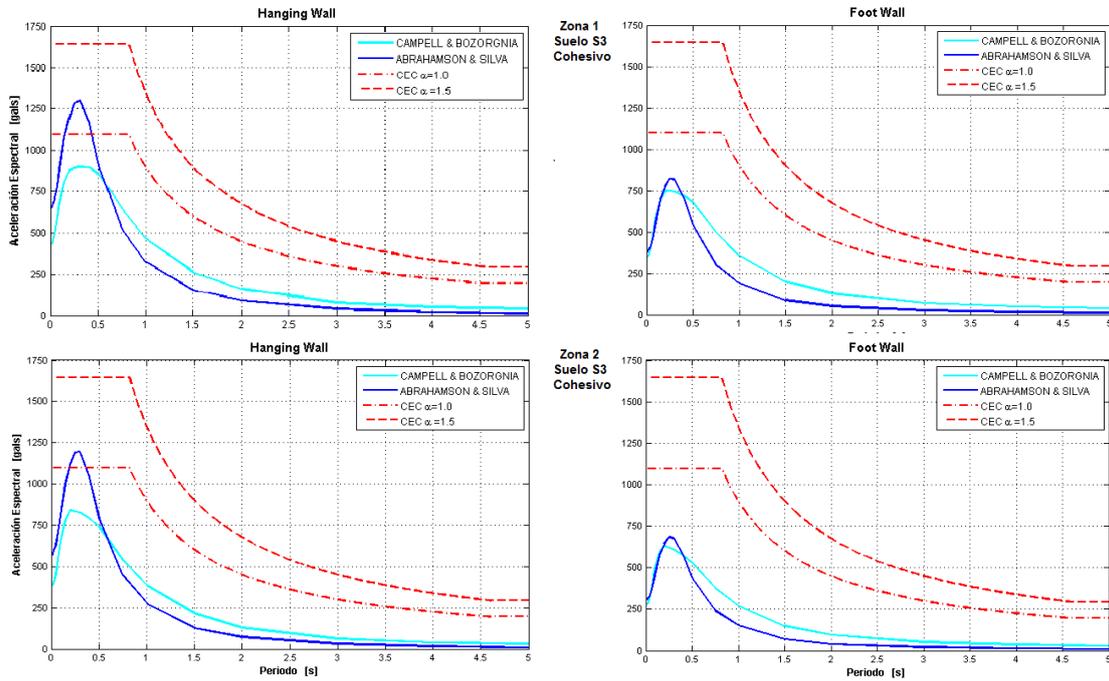


Figura 5.5 Espectros para perfil de suelo S3 Cohesivo. Período de retorno 475 años.

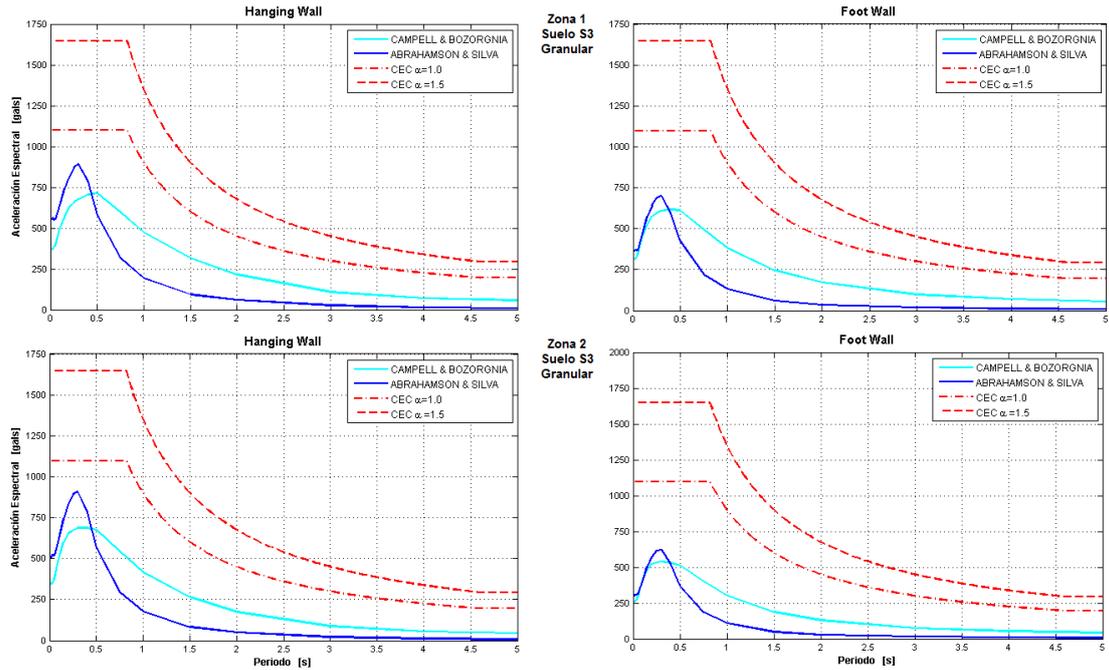


Figura 5.6 Espectros para perfil de suelo S3 Granular. Período de retorno 475 años.

5.5. RESULTADOS PARA PERÍODO DE RETORNO DE 72 AÑOS

En las figura 5.7 a 5.10 se presentan los espectros para un período de retorno de 72 años, para perfiles de suelo S1, S2, S3 cohesivo y S3 granular.

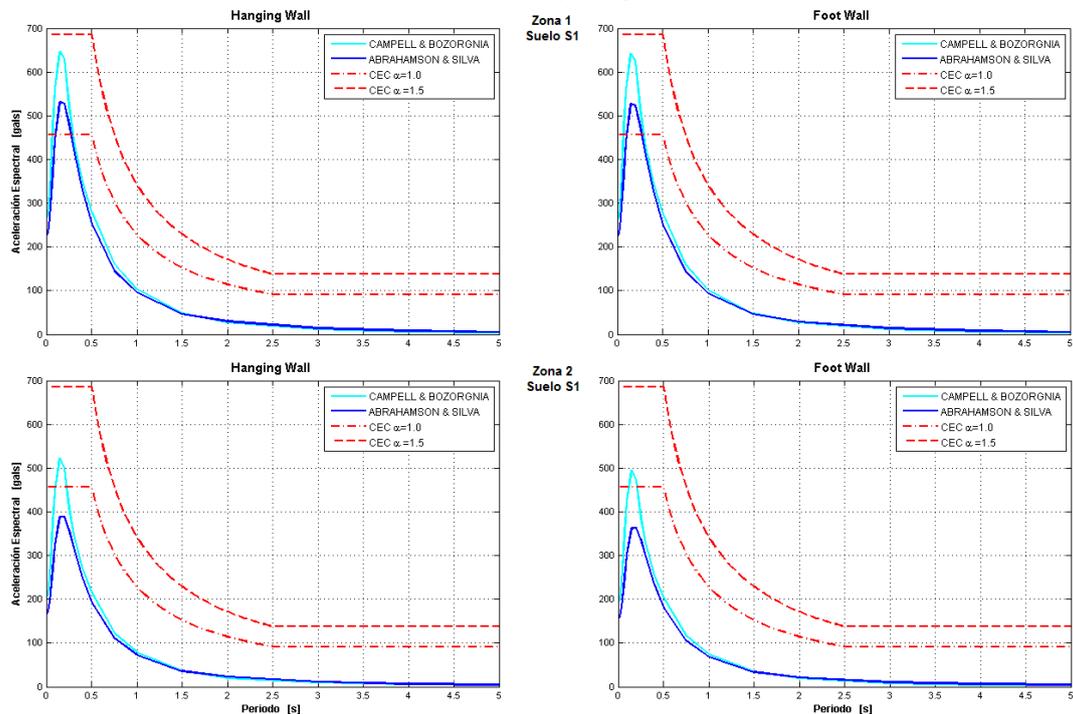


Figura 5.7 Espectros para perfil de suelo S1. Período de retorno 72 años.

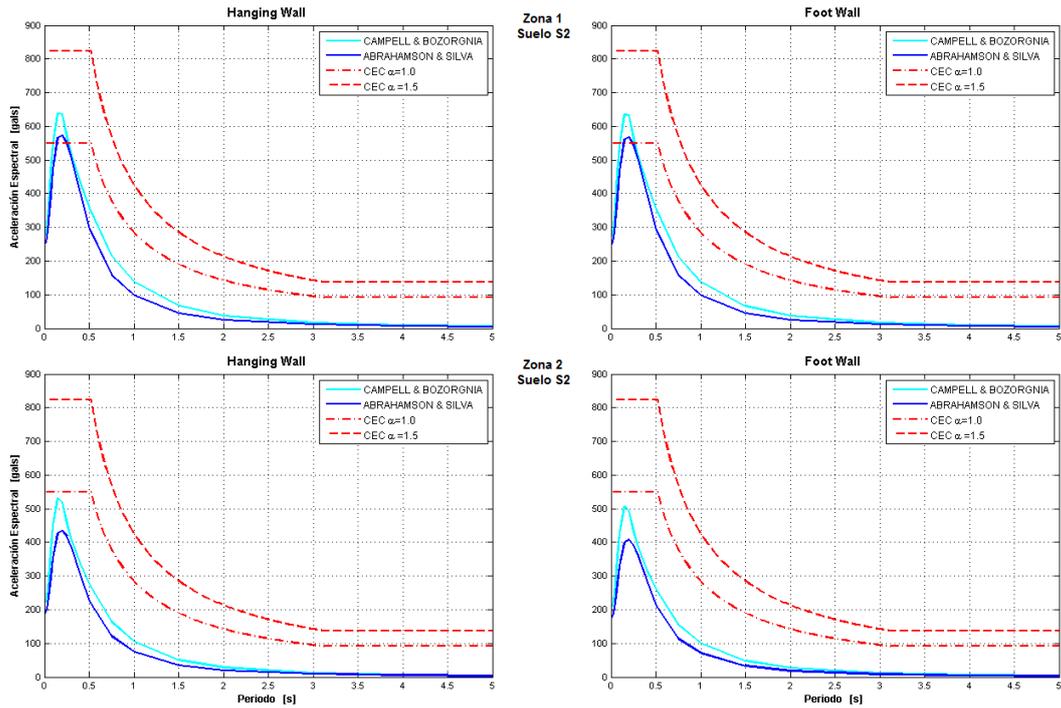


Figura 5.8 Espectros para perfil de suelo S2. Período de retorno 72 años.

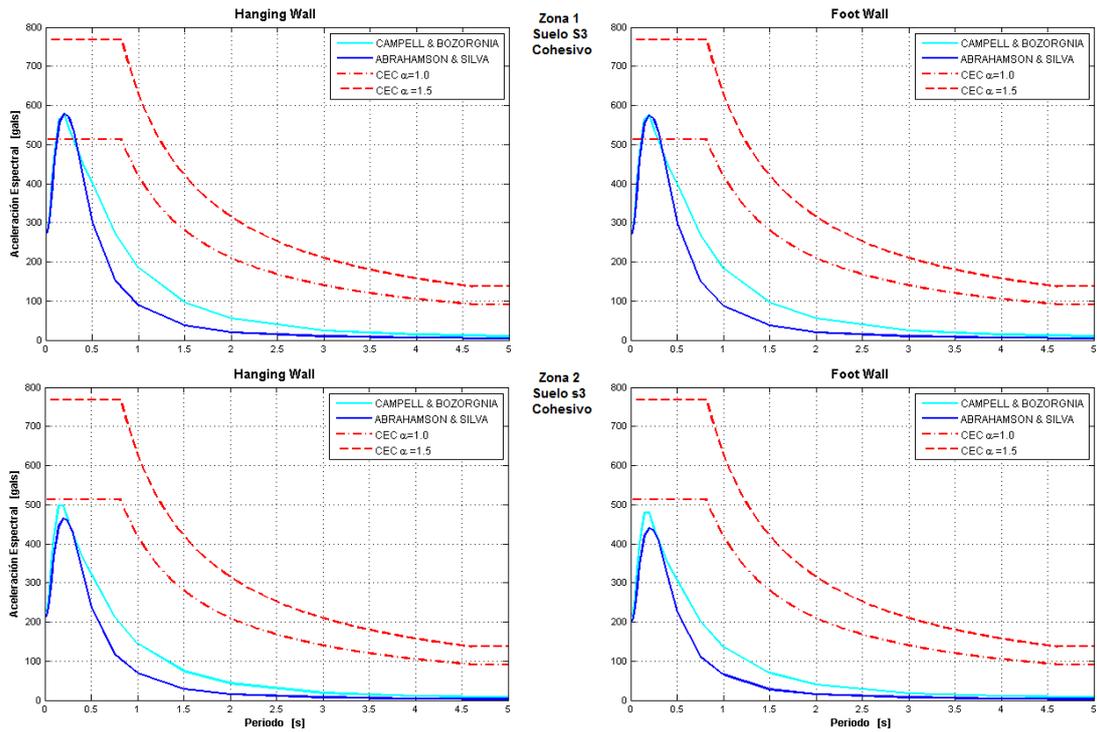


Figura 5.9 Espectro para perfil de suelo S3 Cohesivo. Período de retorno 72 años.

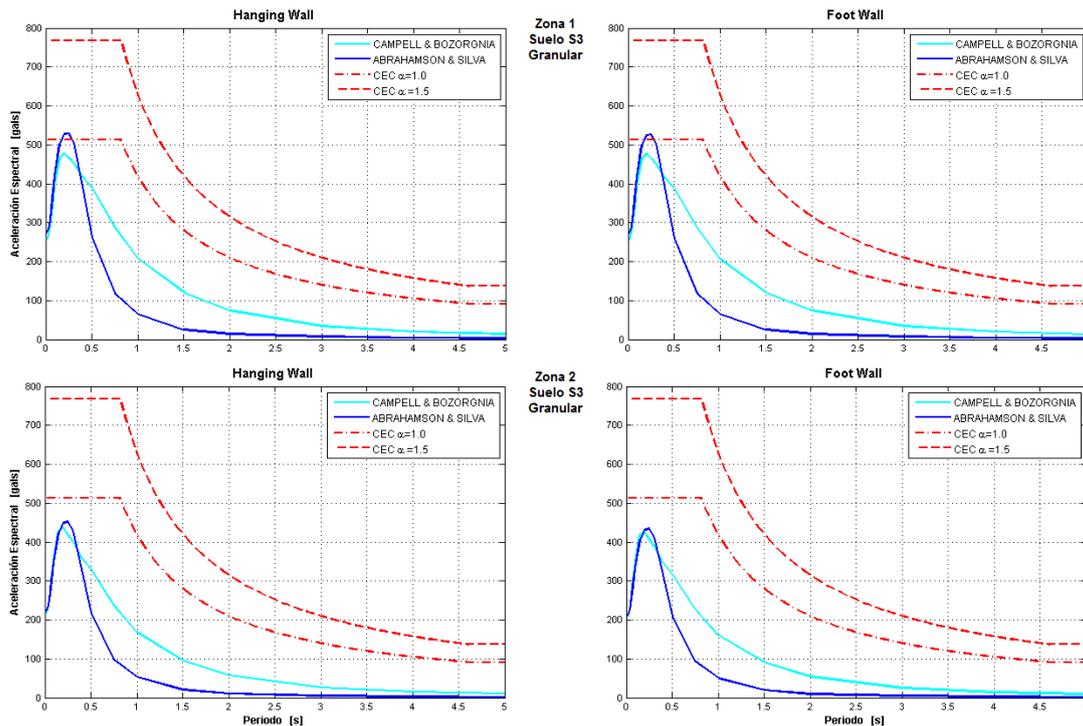


Figura 5.10 Espectros para perfil de suelo S3 Granular. Período de retorno 72 años.

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

- En base a los sismos registrados a partir de 1900 se ha determinado ventanas de tiempo, en las cuales la muestra de datos sísmicos puede considerarse estable, para cada una de las fuentes sísmicas del Ecuador y para cada rango de magnitud; empleando el Método Gráfico y el Método de Stepp, del estudio realizado se concluye que el Método gráfico reporta ventanas de tiempo similares a las que se obtienen con el Método de Stepp.
- Con el catálogo sísmico que tiene el CEINCI-ESPE, compuesto por 8147 sismos se han determinado las ventanas de tiempo indicadas en la tabla 4, en los cuales los datos sísmicos se consideran estables. Esta información es muy importante para determinar las relaciones de recurrencia en cada una de las zonas fuentes.
- El Método de Abrahamson & Silva trabaja con una base de datos que incluye premonitores, réplicas y sismos principales; mientras que el Método de Campbell & Bozorgnia solo trabaja con sismos principales., siendo más confiable emplear el segundo método.
- Por otro lado cuando los valores de PGA de cada uno de los modelos son similares, las dos curvas de los espectros que se obtiene por los modelos tienden a ser similares.
- Finalmente se debe indicar que los espectros en las zonas que se encuentran en Hangin Wall presenta aceleraciones espectrales más altas que las encontradas para las zonas de Foot Wall. Por lo que en el ámbito de la construcción es más económico y seguro realizar una obra en la zona de Foot Wall.
- De los espectros que se obtiene del modelaje para las zonas 1 y 2 cercanas a la falla de Nanegalito se concluye que por ser una falla inversa superficial (se observa afloramientos de la falla desde algunos puntos en la carretera a Selva Alegre) esta presenta valores de aceleración espectral altos, debido a que existe una relación inversamente proporcional entre la profundidad de la falla y su aceleración máxima horizontal del suelo. Por lo que se debe tener en cuenta para todas las obras que se construirán en esta zona no solo el espectro de diseño del código CEC200, sino

también los espectros obtenidos por otros modelos que tienen en cuenta las características físicas y morfológicas de la falla.

- Cuando los espectros que se obtiene por los modelos de Campbell & Bozorgnia y Abrahamson & Silva son muy pequeños, se deberá utilizar el espectro de CEC200, para cada uno de los casos. En el ámbito constructivo se debe utilizar para el diseño el espectro que presente un mayor valor, para dar a la estructura su debida seguridad ante un futuro sismo.

REFERENCIAS

1. Abrahamson N., Silva W., (2008). "Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion relations", *Earthquake Spectra, EERI*, 24 (1), 67-97p.
2. Aguiar R. (2011,2). *Espectros elásticos para el diseño de los puentes sobre los ríos: San Pedro y Chiche de la ruta Sur al nuevo aeropuerto de Quito*, Estudio de Peligrosidad Sísmica realizado para Fernando Romo Consultores. Quito.
3. Aguiar R., (2010). *Estudio de Peligrosidad Sísmica y Espectro de Diseño de la Presa Chontal*, Consultora ASTEC GEODATA, 30 p., Quito.
4. Aguiar R., (1982). *Evaluación de la amenaza sísmica del Ecuador en términos probabilísticos y mapa de Zonificación*, Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Central de Venezuela, 178 p. Caracas.
5. Aguiar R., (2003). *Análisis sísmico por desempeño*, Centro de Investigaciones Científicas. Politécnica del Ejército, 340 p. Quito.
6. Aguiar R., (2011). *El Mega Sismo de Chile de 2010 y lecciones para Ecuador*. Centro de Investigaciones Científicas, CEINCI-ESPE. Instituto Panamericano de Geografía e Historia IPGH., 184 p. Quito.
7. Aguiar R., Castro C., (2009). "Zonas fuentes para estudios de peligrosidad sísmica en el Ecuador", *Antología Científica de Ingeniería Estructural y Sísmica en Países Andinos. Consulado del Perú en el Ecuador.*, 87-111. Guayaquil.
8. Aguiar R., Trémolières A., (2002). "Vulnerabilidad sísmica de los cuatro centros de Quito", *Revista Ciencia. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército*, 5 (2), 191-221. Sangolquí, Ecuador.
9. Aguilar A., (2001). *CRISIS 99.1 Sistema de computo para el cálculo de Peligro Sísmico*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México., 96 p. México, D.F.
10. Aguinaga G., (1996). *Estimación del período de vibración de los suelos de Quito en función de las condiciones locales del suelo*", Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Escuela Politécnica Nacional. Quito.
11. Alvarado A., (1996). *Evolución Geológica cuaternaria y paleosismicidad de la cuenca de Quito, Ecuador*. Tesis de Grado de Ingeniería. Facultad de Geología Minas y Petróleo. Escuela Politécnica Nacional, 380 p. Quito.
12. Bonifaz H., (1992). *Propiedades de la Cangahua en condiciones dinámicas*, Tesis de grado para obtener título de Ingeniero Civil. Especialista en Geotecnia. Escuela Politécnica Nacional. Quito.
13. Bonifaz H., (2011). Conversación personal sobre la Cangahua de Quito. *Laboratorio de suelos. Escuela Politécnica del Ejército*, Sangolquí, Ecuador.
14. Boore D., Watson-Lamprey J., Abrahamson N., (2006). "Orientation-independen measures of ground motion", *Bulletin of the Seismological Society America*, Vol 96 N.- 4 A., 1502-1511.
15. Campbell K., Bozorgnia Y., (2008). "NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped linear elastic response spectra for periods ranking from 0.01 to 10 s.", *Earthquake Spectra, EERI*, 24 (1), 139-171.
16. CEC-2000. "Código Ecuatoriano de la Construcción", *XIII Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural. Pontificia Universidad Católica del Ecuador*, 325-350p. Quito.
17. Cornell C., Vanmarcke E., (1969). "The mayor influence on seismic risk", *Proc.*, 4 WCEE, Vol I, A-1, 69-83. Santiago de Chile.
18. Echeverría M., (2011). Conversación personal sobre la Falla de Nanegalito. Sangolquí, Ecuador.

19. Eguez A., Alvarado A., Yepes H., Machette M., Costa C., Dart R., (2003). *Database and map of Quaternary faults and Folds of Ecuador and its offshore regions*, U.S. Geological Survey, Open-File Report 03-289, 77 p.
20. Escuela Politécnica Nacional, Geohazards International, Ilustre Municipio de Quito, Orstom, OyoCorporation, (1994). "The Quito-Ecuador, Earthquake Risk Management Project", *Geohazards International Publication*, Quito.
21. Frau C., (2010). *Demanda sísmica incluyendo efectos de directividad en zonas near-fault de Argentina*, Tesis para obtener el título de Doctor. Universidad Tecnológica Nacional, Regional Mendoza, 371 p., Mendoza.
22. Gutenberg B., Richter C., (1944). "Frequency of Earthquake in California", *Bulletin of the Seismological Society of America*. BSSA, 34, 185-188.
23. Lavenu A., (1994). "La neotectónica ejemplos en el Ecuador", *Estudios de Geografía*, 6, 5-30.
24. Lecaro M., León F., Moyano C., (1987). *Zonificación de los suelos de Quito y correlación de los ensayos de penetración estándar con parámetros dinámicos* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Escuela Politécnica Nacional. Quito.
25. Lomnitz C., (1988). "Las causas probables de la catástrofe sísmica del 19 de septiembre de 1985", *Revista Ciencia y Desarrollo*, CONACYT, 16 (82), 4 p., México.
26. Molina E., Marroquín G., Escobar J., Talavera E., Rojas W., Camacho E., Lindholm C., Gaspar J., Marcía M. J., Pérez M., Rivas A., García R., (2008). *Evaluación regional de la amenaza sísmica en Centro América*, Universidad Politécnica de Madrid. Proyecto con América Latina 2008, AL08-PID-038, Informe Final, 86 p. Madrid.
27. Núñez C., (2011). "Geología del cuaternario y geomorfología tectónica entre Villadora y Bellavista, río Guayllabamba", Tesis para obtener el título de Ingeniero Geólogo. Escuela Politécnica Nacional. Quito.
28. Norma Ecuatoriana de la construcción (2011). *Peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente*, 11-52p.
29. Norma de Aislación (2001). *Proposición de código para el análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*, Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica. Achisina, 70 p. Santiago de Chile.
30. Norma NCh 433. Of 96 (1996), *Diseño Sísmico de Edificios*, Instituto de Normalización, INN-Chile, 42 p. Santiago de Chile.
31. Ordaz M., (2002). "Sismicidad y Riesgo Sísmico", *Curso sobre Diseño y Construcción Sismorresistente de Estructuras*. CENAPRED. JICA, 19-38. México D.F.
32. P.G.M. (2009). *Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes*. Proyecto Multinacional Andino: Geociencia para las comunidades Andinas. Sistema Quito, Alexandra Alvarado, 294-299.
33. PMA (2009). *Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes*. Proyecto Multinacional Andino: Geociencia para las Comunidades Andinas. Publicación Geológica Multinacional N.- 7. 311p. Canadá.
34. Quijada P., Gajardo E., Franke M., Kozuch J., Grases J., (1993). "Análisis de amenaza sísmica de Venezuela para el nuevo mapa de zonificación con fines de Ingeniería", *Memorias del VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo Resistente*. Mérida, Venezuela.
35. Richter C., (1958). *Elementary Seismology*, Freeman, San Francisco.
36. Ruiz S., (1985). "Conceptos fundamentales de la Teoría de Probabilidades para análisis de riesgo sísmico", *XI Curso Internacional de Ingeniería Sísmica. Análisis de Riesgo Sísmico*. Universidad Nacional Autónoma de México, 20 p. México D.F.
37. Salvador R., (1998). *Informe Técnico Estudio de Mecánica de Suelos de la Torre de la Iglesia de la Compañía de Jesús*. Quito.
38. Sarrazín M., (2010). "Terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010. Aspectos generales, comportamiento de estructuras y deficiencias de las normas", *Conferencia Magistral en XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*. San Juan, Argentina.
39. Schnabel, Lysmer, Seed, (1992). *User's manual for Shake91*, Center for Geotechnical Modeling. Department of Civil Engineering. California.
40. Seed H., Romo M., Sun J., Jaime A., Lysmer J., (1987). *Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the earthquake of Sep. 19, 1985*, Earthquake Engineering Reserch Center, UCB-EERC-87/15, 112 p.

41. Silva N., (2008). *Caracterización y determinación del peligro sísmico en la Región Metropolitana*, Tesis de Grado para obtener título de Ing. Civil. Universidad de Chile, 155 p. Santiago de Chile.
42. Soulas J-P., Egeuz A., Yepes H., Perez H., (1991). "Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia", *Boletín Geológico Ecuatoriano*, 2 (3), 3-11.
43. Stepp J.C., (1973). *Analysis of complétense of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area, in contributions to seismic Sonic*, NOAA Tech. Report, ERL 267-ESL30. Washington, D.C.
44. Tavera H., Bernal J., Salas H., (2008). "El terremoto de Pisco del 15 e agosto de 2007: Aspectos sismológicos", *Libro: El sismo de Pisco de 2007. Editor H. Tavera, Instituto Geofísico del Perú*, 13-22. Lima.
45. Tornello M., Frau C., (2010). "Experiencias sobre aislamiento sísmico en Mendoza, Argentina. Diseño, Modelación y Construcción", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 15 (1), 1-47.
46. Toulkeridis T., (2009). "Geodinámica y Vulcanología del Ecuador (Continental e Insular) Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgos", Encuentro Internacional sobre gestión del Riesgo Natural con énfasis en el Sector Eléctrico. Universidad San Francisco de Quito. Quito, Ecuador.
47. Valverde J., Fernández J., Jiménez E., Vaca T., Alarcón F., (2002). *Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de la Ciudad de Quito*, Escuela Politécnica Nacional. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 146 p. más Anexos. Quito.
48. Wesnousky S., (1994). "The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution wich is it?", *Bulletin of the Seismological Society of America. BSSA*, 84, 1940-1959.
49. Yeats R., Sieh K., Allen C., (1997). *The geology of earthquakes*. Oxford University Press. 499 p. New York.
50. Yepes H., (2011). Información suministrada en reunión efectuada el 29 de junio de 2011, en la Cámara de la Construcción de Pichincha. Quito.
51. Zöller, G., Hainzl, S. and Holschneider, M., 2008. "Recurrent Large Earthquake in a Fault Region: What Can Be the Inferred from Small and Intermediate Events?". *Bulletin of the Seismological Society of America*. 98. No. 6. 2641-2651.