

ACELEROGRAMAS Y ESPECTROS INFERIDOS DEL TERREMOTO 1998 (Mw 7,2), BAHÍA DE CARÁQUEZ, ECUADOR*

Roberto Aguiar¹, Enrique Morales², Kervin Chunga³, Evelyn Iza⁴ y Fernando Del Castillo⁵

Resumen

Recibido: 23 de febrero de 2016

Evaluado: 10 de mayo de 2016

Aceptado: 29 de junio de 2016

Los datos de acelerogramas de terremotos con magnitudes $M_w \geq 7$ no han sido registrados para la costa de Ecuador. La red sismológica de este país, que inicia su funcionamiento en 1988, ha registrado solamente un terremoto fuerte: el de Bahía de Caráquez del 4 de agosto de 1998 (Mw 7,2). Bahía de Caráquez se halla ubicada en la Provincia de Manabí y los acelerógrafos disponibles en la región no rastrearon en forma apropiada este sismo; solo se cuenta con un registro obtenido en Guayaquil, que se halla aproximadamente a 250 km del epicentro, pero no hay datos de registros de campo cercano. En consecuencia, en la investigación cuyos resultados se reportan en este artículo se ha aplicado un modelo tectónico de interplaca tipo “thrust” de bajo ángulo, delineando el plano de falla del desplazamiento, lo que ha permitido determinar el espectro de respuesta del terremoto. Además, se han usado como referencia, terremotos con escenario tectónico de características similares a los de la costa central del Ecuador, con rangos de períodos cortos, aplicando el modelo de promedios ponderados, con lo que posteriormente se escalaron sismos de subducción en el margen continental peruano de 1966 (Mw 8,1), 1970 (Mw 7,9), 1974 (Mw 8,0) y 2007 (Mw 7,9). En este sentido, nos interesa difundir la metodología de trabajo y así poder escalar sismos de magnitudes similares con una ecuación de movimientos fuertes para fuentes interplaca tipo Thrust.

Palabras Claves: sismos interplacas, estructuras sismogénicas, escalamiento de sismos.

¹Ecuatoriano. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Centro de Investigaciones en Ingeniería Sísmica Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta Ecuador Av. Gral. Rumiñahui s/n. Valle de los Chillos, P.O.BOX: 171-5-231B, Sangolquí, Ecuador, rraguiar@espe.edu.ec

²Ecuatoriano. Estudiante de Doctorado. University of New York at Buffalo, Department of Civil, Structural, enriquea@buffalo.edu

³Ecuatoriano. Profesor Principal. Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL. Guayaquil, Ecuador Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Campus Gustavo Galindo Km 30,5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, kervin.chunga@gmail.com

⁴Ecuatoriana. Estudiante de Pregrado. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, eiza@espe.edu.ec

⁵Ecuatoriano. Profesor-Investigador. Centro de Investigaciones en Ingeniería Sísmica Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta Ecuador, delcastilloborja@gmail.com

*El 16 de abril de 2016, un terremoto de magnitud 7.8, dejó gran daño en las estructuras de Bahía de Caráquez y es la única ciudad en que no se tuvo registros; de tal manera que este artículo que trata sobre el sismo de 1998, es un aporte a la sismología del lugar y sus estructuras.

ACCELEROGRAMS AND INFERRED RESPONSE SPECTRA, 1998 BAHIA DE CARÁQUEZ EARTHQUAKE, MW 7,2, ECUADOR'S CENTRAL COAST.

Roberto Aguiar , Enrique Morales , Kervin Chunga , Evelyn Iza y Fernando Del Castillo

Received: February 23, 2016

Evaluated: May 10, 2016

Accepted: June 29, 2016

Abstract

Accelerograms data of earthquakes with magnitudes $M_w \geq 7$ are not yet registered for the coast of Ecuador. The seismological network in this country, which started its operation in 1988, has only registered a strong earthquake: The Bay of Caráquez of August 4, 1998 (Mw 7.2). Bahia de Caraquez is located in the province of Manabi, and accelerometers available in the region did not track as appropriate this earthquake, it only has a record obtained in Guayaquil, which is approximately 250 km from the epicenter, but no data near-field record are available. Consequently, research whose results are reported in this article has been applied to inter-plate tectonic low angle model type "Thrust", delineating the displacement fault plane, which has led to identified the earthquake response spectrum. In this research also has been used as a reference, earthquakes with tectonic scenario similar to those of the central coast of Ecuador, ranging from short periods, applying the model of weighted averages, which subsequently subduction earthquakes were scaled in the continental Peruvian margin 1966 (Mw 8.1), 1970 (Mw 7.9), 1974 (Mw 8.0) and 2007 (Mw 7.9). In this sense, we want to know the methodology and be able to scale earthquakes of similar magnitudes with an equation of strong motions for "Thrust" type inter-plate sources.

Palabras Claves: interplate earthquakes, seismogenic structures, scaling of seismic spectrum.

ACELEROGRAMAS E ESPECTROS INFERIDOS DO TERRAMOTO 1998 (Mw 7,2), BAHIA DE CARÁQUEZ, EQUADOR

Roberto Aguiar , Enrique Morales , Kervin Chunga , Evelyn Iza y Fernando Del Castillo

Recebido: 23 de fevereiro de 2016

Avaliadas: 10 de maio de 2016

Aceito: 29 de junho de 2016

Resumo

Os dados de acelerogramas de terremotos com magnitudes $M_w \geq 7$ não têm sido registados para a costa do Equador. A rede sismológica deste país, que inicia seu funcionamento em 1998, tem registado somente um terremoto forte: o de Bahia de Caráquez do 4 de agosto de 1998 (Mw 7,2). Bahia de Caráquez acha-se localizada na Província de Manabí e os acelerógrafos disponíveis na região não rastrearam em forma apropriada este sismo, só se conta com um registro obtido em Guayaquil, que se acha aproximadamente a 250 km do epicentro, mas não há dados de registros de campo próximo. Em consequência na investigação cujos resultados se reportam neste artigo se aplicou um modelo tectónico de interplaca tipo “thrust” de baixo ângulo, delineando o plano de falha da deslocação, o que tem permitido determinar o espectro de resposta do terremoto. Ademais usaram-se, como referência, terremotos com palco tectónico de características similares à costa central do Equador, com faixas de períodos curtos, aplicando o modelo de médias ponderados, com o que posteriormente se escalaram sismos de subducción na margem continental peruano de 1966 (Mw 8,1), 1970 (Mw 7,9), 1974 (Mw 8,0) e 2007 (Mw 7,9). Neste sentido, interessa-nos dar conhecer a metodologia de trabalho e assim poder escalar sismos de magnitudes similares com uma equação de movimentos fortes para fontes interplaca tipo Thrust.

Palavras chave: sismos interplacas, estruturas sismogênicas, escalamiento de sismos

Introducción

El 4 de agosto de 1998, un sismo de magnitud 7,2 fue registrado frente a las costas de la ciudad de Bahía de Caráquez (costa central de Ecuador, en la Provincia de Manabí), y puso a prueba la calidad del diseño de los modernos edificios de hormigón armado de esta ciudad turística. Algunas edificaciones, de entre cuatro y seis pisos, tuvieron un comportamiento inadecuado al sismo, no así las estructuras de más de 10 pisos; la razón, como se verá posteriormente, es por la forma de dispersión que tuvieron sus ordenadas espectrales más altas en la zona de períodos cortos.

Como muestra se puede observar en la parte superior de la Figura 1 el edificio El Calipso, antes y después del sismo de Bahía de Caráquez de 1998. Era una estructura de seis plantas con poca redundancia (nueve columnas en total) y fue el único edificio que colapsó durante el sismo. En la parte inferior de la Figura 1 se presentan dos estructuras de cinco pisos que tuvieron gran daño en las columnas y son el edificio Karina que tuvo problemas de torsión por ser un *edificio de planta abierta* y el edificio Los Corales que tenía problemas de *columna corta*. Estos dos edificios resistieron el sismo, pero después fueron derribados.

Figura 1. Estructura que colapsó (superior) y estructuras que soportaron el sismo, pero fueron derribados posteriormente por daño considerable en columnas.



Fuente: Aguiar R., Romo M., Torres M., Caiza P., (2008)

Ese sismo estuvo muy cerca de llevar al colapso al único hospital de esa ciudad, que es el Miguel H. Alcívar, que se abreviará de aquí en adelante MHA. Un buen número de las columnas perimetrales se dañaron, a la izquierda de la Figura 2 se puede apreciar la columna que sufrió mayor daño, se observa que algunos hierros longitudinales se pandearon y se ve la típica falla de corte debido a la falta de refuerzo transversal (Aguiar R., Romo M., Torres M., Caiza P., 2008).

Figura 2. Daño en una columna perimetral del Hospital MHA durante el sismo de Bahía de Caráquez de 1998 y estructura reforzada después del sismo



Fuente: captura propia

Posteriormente, en los años 2000 y 2001 este hospital fue reparado y reforzado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Ecuador, empleando el espectro de diseño recomendado por el Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000, vigente para aquel momento. A la derecha de la Figura 2 se aprecia que las ventanas de la fachada principal se modificaron en un vano por la construcción de un muro de corte, con el cual se reforzó el hospital y así se incrementó la resistencia del hospital MHA con la colocación de cuatro muros de corte en cada una de sus fachadas.

Los acelerógrafos disponibles en la región cercana a Bahía de Caráquez no registraron en forma apropiada el sismo de 1998, solo se tiene un registro obtenido en Guayaquil, que se halla aproximadamente a 250 km, del epicentro. Por lo tanto, interesa encontrar una forma espectral de este sismo para una edificación como es el hospital MHA y acelerogramas con los cuales se podría conseguir la respuesta no lineal de esta importante estructura.

Para el logro de ese propósito, en este artículo se determina en primer lugar un probable plano de falla del sismo de 1998; posteriormente se encuentra el espectro de respuesta elástica en el Hospital MHA para 5% de amortiguamiento utilizando el modelo de movimientos fuertes propuesto por Zhao *et al.* (2006).

Luego se trabaja con los acelerogramas de cuatro sismos de Perú, registrados en 1966 (Mw 8,1), 1970 (Mw 7,9), 1974 (Mw 8,0) y 2007 (Mw 7,9), que son de una fuente tectónica similar a la generadora del sismo de Bahía de Caráquez de 1998, los mismos que son escalados al espectro encontrado con el modelo de Zhao *et al.* (2006), empleando el modelo de promedios ponderados para el rango de interés propuesto por el ASCE 7-10, y considerando el período de vibración

promedio del hospital MHA sin reforzamiento. Como se verá posteriormente, el hospital tiene 4 bloques estructurales de diferente altura.

Lo importante es conocer la metodología de trabajo, para luego escalar los sismos de Perú, más el sismo de 1998 registrado en Guayaquil, para el espectro que se determine con una ecuación de movimientos fuertes en fuentes interplaca tipo Thrust. También nos atañe saber, en forma aproximada, la aceleración máxima probable del sismo de 1998 en el hospital MHA y la forma del espectro de respuesta elástico.

Terremotos de subducción para la Costa Central del Ecuador y plano de falla del sismo de 1998

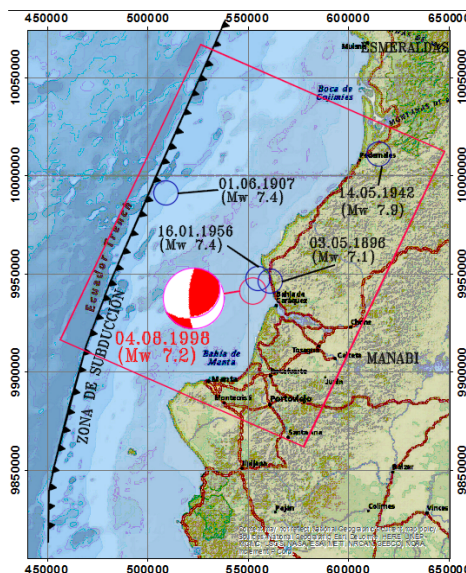
La zona de subducción del Ecuador tiene 576 kilómetros de longitud, pero si se considera la geodinámica de subducción desde la costa norte de Perú, alcanzando la parte sur andina del territorio continental del Ecuador, la zona de subducción tiene 756 kilómetros de longitud (Chunga, Aguiar, Zambrano, Quiñonez, Galarza, 2016). Esta zona tectónica es la principal estructura sismogénica capaz de generar sismos en el orden de 8 a 9 grados de magnitudes.

Las tendencias estructurales de la zona de subducción, los altos batimétricos y la geomorfología del margen continental permiten distinguir tres principales segmentos tectónicos, la costa sur correspondiente al Golfo de Guayaquil y parte norte de la provincia de Santa Elena, la costa norte delineada para zona subsidente de la provincia de Esmeraldas.

La costa central del Ecuador, frente a la provincia de Manabí, tiene una característica morfotectónica distinta asociada a un rápido levantamiento tectónico en el orden de los 0.5 mm/año (Pedoja *et al.*, 2006), en este segmento continental asociada a la geodinámica

activa de la colisión y empuje de la placa oceánica de Nazca, se han documentado cinco fuertes terremotos de subducción: (a) terremoto del 3 de mayo de 1896 con Mw 7.1, (b) terremoto del 1 de enero de 1907 con Mw 7.4, (c) terremoto del 14 de mayo de 1942 con Mw 7.9, (d) terremoto del 16 de enero de 1956 con Mw 7.4, y (e) terremoto del 4 de agosto de 1998 con Mw 7.2. Los epicentros de estos cinco sismos se indican en la Figura 3.

Figura 3. Terremotos de subducción generados en la costa central del Ecuador, donde la estructura tectónica tiene 165 kilómetros de longitud y podría generar terremotos en el orden de 8 a 8.3 grados de magnitud



Fuente: elaboración propia

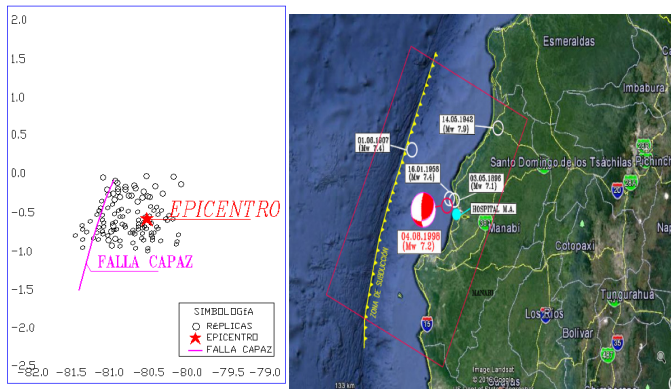
La estructura sismogénica de subducción en la costa central tiene 165 kilómetros de longitud, pudiendo alcanzar máximos valores estimados de magnitud de 8.3 grados y PGA de 0.42 g (Chunga et al, 2016). El plano de Benioff entre los 40 a 50 kilómetros de profundidad tiene una inmersión estructural entre los

4° a 5°, incrementando su inclinación entre los 17° a 28° debajo de los Andes septentrionales.

Los efectos geológicos cosísmicos son generados durante el terremoto, y dependiendo del escenario geológico que se encuentre en el territorio puede ser propenso a: deslizamientos de laderas inestables, subsidencia natural o antropogénica, licuefacción de suelos, fallamientos superficiales o grietas en el terreno (Michetti *et al.*, 2007). Estos rasgos cosísmicos fueron observados en el último terremoto fuerte acontecido en el territorio (coordenadas del epicentro, -80,33 y -0,55, hipocentro de 22 kilómetros de profundidad), en el área epicentral de Bahía de Caráquez se documentaron deslizamientos en laderas y volcanes de arenas por licuefacción de suelos. Estas condiciones de suelos de mala calidad permiten una ampliación de las ondas sísmicas que provocaron posteriores daños estructurales en edificaciones.

Esta falla capaz, que se muestra en la Figura 4, es la fuente de los siguientes sismos de magnitud mayor a 7: 1942 (Mw 7,9); 1956 (Mw 7,4); 1907 (Mw 7,4) y 1896 (Mw 7,1). Al sismo de 1942 se le conoce con el nombre de sismo de Guayaquil, por el gran daño que registraron las estructuras de hormigón armado de esa ciudad, a pesar de que se halla bastante distante del epicentro (205 Km de distancia, Chunga *et al.*, 2016). En esta misma gráfica se presenta, a la izquierda las réplicas del sismo de 1998 hasta el 31 de enero de 1998 (Segovia, Yepes, Pacheco, Shapiro, Egred, 2004) y a la derecha el mecanismo focal del sismo de 1998. En la Tabla 1 se indica los parámetros geométricos que definen la falla capaz.

Figura 4. Sismo de 1998 y falla capaz generadora del sismo



Fuente: elaboración propia

Tabla 1. Parámetros geométricos de la falla capaz que generó el sismo de 1998

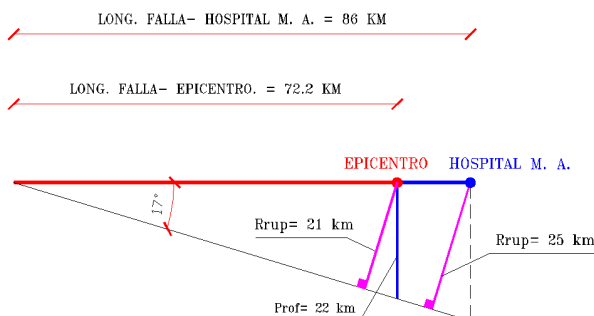
Tipo	Longitud de falla (km)	Azimut	Buzamiento aparente	Rake	Ancho de falla	Posición Estructural de falla
Inversa	165	16	35	+110	15	Hangingwall

Fuente: Chunga et al. (2016)

En la Figura 4 se aprecia la ubicación del hospital MHA, que se encuentra bastante cercana al epicentro. La longitud desde el epicentro a la falla capaz generadora del sismo de 1998 es de 72,2 km, y desde el hospital MHA es de 86 km. Con estos datos y considerando la profundidad del sismo de 22 km, se determinó que la distancia del hospital MHA al plano de falla es

$R_{rup} = 25 \text{ km}$, que se presenta en la Figura 5.

Figura 5. Cálculo de la distancia R_{rup} del Hospital MHA al plano de falla



Fuente: elaboración propia

Modelo de movimientos fuertes

Los modelos de movimientos fuertes son utilizados para definir leyes de atenuación del movimiento del suelo o determinar espectros de respuesta elásticos para 5% de amortiguamiento. Existe una gran cantidad de modelos para determinar espectros para el movimiento horizontal del suelo, en fallas corticales como los desarrollados por Campbell y Borzognia (2014); Abrahamson, Silva y Kamai (2014); Chiou y Young (2014), entre otros.

En la búsqueda de espectros para la componente vertical de movimiento de suelo, cuyo origen sea una falla cortical, no se tienen tantos modelos como para la componente horizontal; pero existen algunos, entre ellos los desarrollados por: Gulerce, Kamai, Abrahamson y Silva (2013), Stewart, Seyhan, Boore, Atkinson (2013), Borzognia y Campbell (2013), por citar algunos.

No obstante, el sismo de Bahía de Caráquez de 1998 es interplaca tipo *thrust* (inversa de bajo ángulo), de tal manera que no se puede utilizar los modelos indicados en los párrafos anteriores, sino uno que haya tomado en consideración el tipo de fuente indicada y este es el propuesto por Zhao et al. (2006), en que trabajaron con mil 504 registros de sismos ocurridos en fallas inversas interplaca, como es el caso de la falla capaz que generó el sismo de Bahía en 1998.

Los modelos de movimientos fuertes tienen un respaldo en la gran cantidad de registros que consideraron, y también base teórica. Es importante conocer en el modelo seleccionado la forma de la clasificación de suelos adoptada. En el modelo de Zhao et al. (2006) se consideran cuatro tipos de suelo a saber: roca (SC I); suelo duro (SC II); suelo medio (SC III) y suelo suave (SC IV).

La ecuación que permite encontrar espectros o leyes de atenuación del movimiento del suelo, viene dada por la siguiente expresión.

$$\log_e(Y_{ij}) = a.Mw_i + b.X_{ij} - \log_e(r_{ij}) + e(h - hc).\delta h + F_R + S_i + S_s + S_{SL}.\log_e(X_{ij}) + C_k + \xi_{ij} + \eta_i \quad (1)$$

$$r_{i,j} = X_{i,j} + c.\exp(d.Mw_i) \quad (2)$$

Donde Y es el valor de PGA en cm/s^2 (gals), también es el valor del espectro de respuesta de aceleración para un amortiguamiento del 5%, en efecto, es la media de las dos componentes horizontales en cm/s^2 ; M_w es la magnitud de momento; X (km) es la distancia más cercana al plano de ruptura, que más se le conoce como R_{rup} ; h (km) es la profundidad focal, hh no puede superar los 125 km; h_c (km) es una constante de profundidad que equivale a 15 km en los sismos superficiales, poco profundos; δh es una variable indicadora, $\delta h = 0$ cuando $h < h_c$ y

$\delta h = 1$ para $h \geq h_c$; F_R es un parámetro indicador del mecanismo de falla inversa en eventos corticales y es igual a cero para otro tipo de mecanismo o evento; S_i vale la unidad para sismos de subducción inter-placa y vale cero para otro tipo de eventos; S_s es un parámetro utilizado en eventos de subducción intra placa (slab)

y vale cero para otro tipo de eventos; S_{SL} es un parámetro independiente de la magnitud que considera una onda sísmica compleja en eventos de subducción intra placa; C_k es el parámetro que relaciona el tipo de suelo del sitio de interés; a, b, c, d, e son coeficientes que dependen del período; ξ, η son parámetros de definen la incertidumbre del modelo.

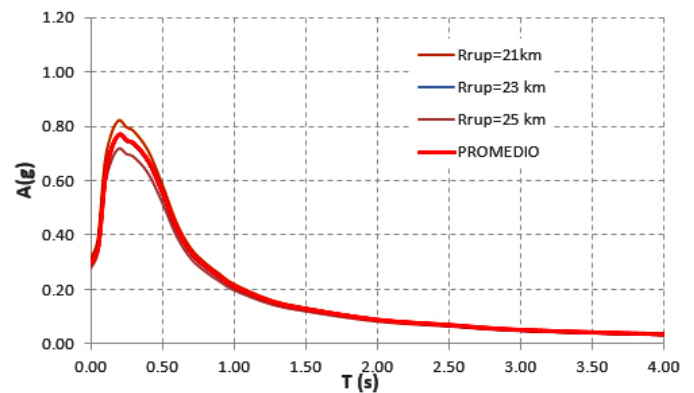
Espectro de aceleraciones

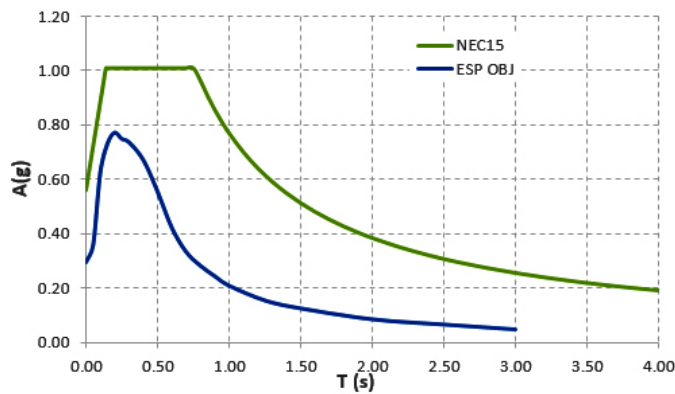
Después del sismo de 1998, se realizaron los estudios de suelo y se encontró que el Hospital MHA está ubicado sobre un perfil de suelo denominado arcilla de baja plasticidad CL, con un número muy bajo de golpes en el ensayo de Penetración Estándar SPT (Aguilar *et al.*, 2008).

Adicionalmente, durante el sismo el suelo estaba muy saturado, ya que por su ubicación geográfica las aguas de los alrededores se depositan en este sitio, razón por la cual en el reforzamiento se construyó una zanja perimetral y se hizo un mejoramiento del suelo.

Por todo lo indicado se clasifica al suelo como SC IV, de acuerdo a la clasificación del modelo de Zhao *et al.* 2006. Con esta información y tomando en cuenta que el sismo de Bahía de 1998 tuvo una magnitud de 7,2, una profundidad focal de 22 km, se obtuvieron los espectros de aceleraciones que se indican a la izquierda de la Figura 6, para diferentes valores de la distancia entre el sitio de interés al plano de falla R_{rup} , para tomar en cuenta la incertidumbre de este parámetro.

Figura 6. Espectros generados para el Hospital Miguel H. Alcívar. Sismo de Bahía de 1998





Fuente: elaboración propia

Se obtuvieron espectros para $R_{rup} = 21, 23 \text{ y } 25 \text{ km}$, aplicando el modelo de Zhao *et al.* (2006) y se halló el espectro promedio. El nivel de confianza de los espectros indicados a la izquierda de la Figura 6 es del 50% debido a que no se trabajó con $\varepsilon = 0, \eta = 0$. A la derecha se compara este espectro con el que reporta la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15 para un perfil de suelo D que se tiene en el hospital MHA y se observa que las ordenadas espectrales del sismo de 1998 son bastante menores que las reportadas por el NEC-15 debido a que no corresponde al sismo de diseño, por todo lo indicado en el Apartado 2 (las magnitudes máximas que se esperan en la falla capaz, están entre 8 y 9).

Escalamiento de sismos

Los espectros dependen del acelerograma y estos a su vez son función de la magnitud del sismo, de la fuente sísmica, de la distancia al sitio, del tipo de suelo, de la topografía del lugar, entre otras variables, lo que demuestra que es bastante complejo lograr que un determinado espectro sea parecido a otro espectro objetivo, en un determinado rango de interés de períodos.

La forma racional de hacerlo es mediante lo que se ha denominado *escalamiento de sismos* y que ha sido

acogido por las normativas sísmicas, que definen el rango de interés, el número mínimo de registros que se deben considerar, la selección de los sismos a escalar, la forma como se debe realizar el análisis sísmico con los sismos escalados y en algunos casos incluso se describe la forma de realizar el escalamiento. En la Tabla 2 se indica el rango de interés en que se debe realizar el escalamiento para estructuras convencionales en función del período fundamental de vibración de la estructura T .

Tabla 2. Rango de Interés de períodos para el escalamiento sísmico

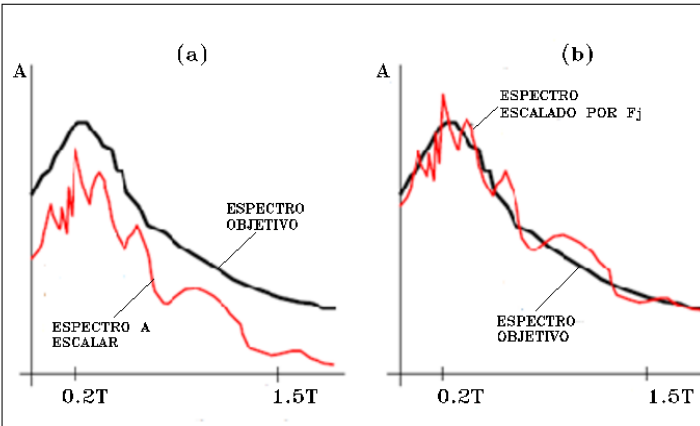
NORMATIVA SÍSMICA	RANGO DE PERÍODOS DE INTERÉS
Norma Europea (Eurocódigo de 2003)	$0,2 T \leq T \leq 2,0 T$
Norma Americana (ASCE 7-10)	$0,2 T \leq T \leq 1,5 T$
Norma Neozelandesa (SNZ 2004)	$0,4 T \leq T \leq 1,3 T$

Fuente: American Society of Civil Engineers ASCE, (2010).

En el escalamiento de sismos se determinan dos factores F_j y F_1 por los cuales se multiplican los acelerogramas para lograr que el espectro promedio que se halla con los acelerogramas escalados sea similar al espectro objetivo, en cierto rango de interés. La forma como se calculan esos factores es lo que ha dado origen a varios métodos de cálculo.

A la izquierda de la Figura 7 se presenta el espectro a escalar, el rango de períodos de interés de acuerdo al ASCE 07-10 y el espectro objetivo al que se desea llegar, multiplicando cada uno de los acelerogramas por un factor F_j . Nótese que se mantiene constante el contenido de frecuencias de los registros.

Figura 7. Espectro promedio a escalar y espectro objetivo al que se desea llegar



Fuente: elaboración propia

Los valores de F_j con que se multiplican los acelerogramas son de tal forma que el error E_j , entre la diferencia del espectro objetivo $\hat{A}$ menos el espectro a escalar A multiplicado por F_j sea un mínimo. La forma como se obtiene es la que da origen a los métodos de escalamiento. Así el ASCE/SEI 7, propone que se obtenga con la siguiente ecuación de Reyes y Kalkan (2012):

$$E_j = \min_{F_1} \|\log(\hat{A}) - \log(F_j A)\| \quad (3)$$

Donde $\|\cdot\|$ es la Norma Euclidiana. Se requiere para este propósito un método numérico que minimice las funciones escalares de una variable. La minimización asegura que cada espectro de respuesta escalado se encuentra muy cerca del espectro objetivo, como se muestra a la derecha de la Figura 7.

Un procedimiento más específico para calcular los factores F_j , que se utilizará en este artículo es el denominado *weighted average* en este caso se tiene:

$$E_j = \sum_{i=1}^4 w_i [\hat{A}(T_i) - F_j A(T_i)]^2 \quad (4)$$

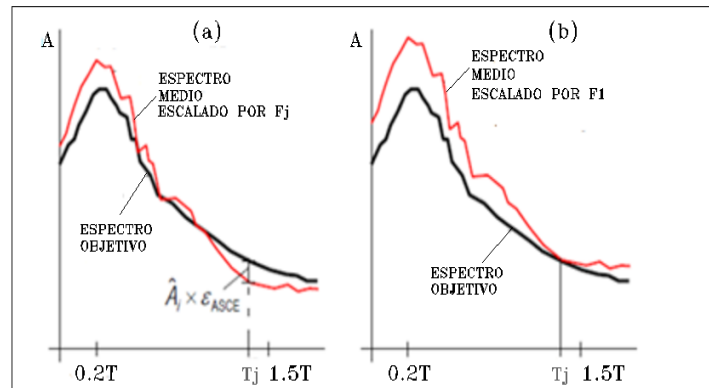
Donde w_i son pesos que se asignan para los períodos seleccionados T_i ; $\hat{A}(T_i)$ aceleración del espectro objetivo en el período seleccionado T_i ; $A(T_i)$ aceleración del espectro a escalar en el período T_i . Al desarrollar la minimización del error E_j se llega a la siguiente ecuación para calcular F_j :

$$F_j = \frac{\sum_1^4 w_i \hat{A}(T_i) \sqrt{A_x^2(T_i) + A_y^2(T_i)}}{\sum_1^4 w_i (A_x^2(T_i) + A_y^2(T_i))} \quad (5)$$

Donde A_x, A_y son las ordenadas de los espectros a escalar en sentido X, Y, respectivamente. Es conveniente trabajar con registros normales y paralelos a la falla, en ese caso A_x, A_y son las ordenadas de los espectros a escalar hallados con los registros normal y paralelo a la falla.

Sea $A_{esc}(T_i)$ la aceleración del espectro escalado en el período T_i . Ahora, puede darse el caso que en el rango de interés existan valores de $A_{esc}(T_i)$ menores al espectro objetivo, como se observa a la izquierda de la Figura 6, por lo que al espectro escalado por F_j se debe multiplicar por un factor F_1 para que todas las ordenadas del espectro escalado seas mayores que las ordenadas del espectro objetivo como se tiene a la derecha de la Figura 8.

Figura 8. Modificación del espectro escalado por el factor F_1



Fuente: elaboración propia

Para calcular el factor F_1 , se procede de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{ASCE} = \max_{0.2 T_n \leq T_i \leq 1.5 T_n} \left(\frac{\hat{A}_i - \hat{A}_{SSC,i}}{\hat{A}_i} \right) \quad (6)$$

$$F_1 = (1 - \varepsilon_{ASCE})^{-1} \quad (7)$$

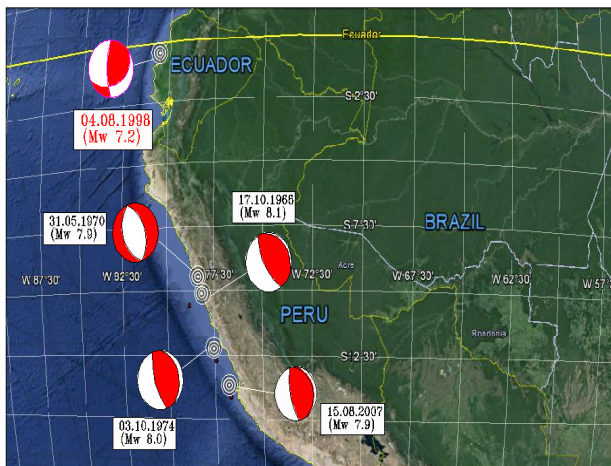
$$F = F_j F_1 \quad (8)$$

El significado de las variables de las últimas ecuaciones ha sido ya indicado.

Sismos seleccionados

Por su cercanía al epicentro del sismo de Bahía de Caráquez de 1998, se examinaron los registros sísmicos de cuatro terremotos interplaca tipo *Trhust* que causaron considerables daños en Perú y son los sismos de Lima de 1966 (Mw 8,1) y 1974 (Mw 8,0), el sismo de Chimbote de 1970 (Mw 7,9) y el sismo de Pisco de 2007 (M 7,9), cuyos epicentros se presentan en la Figura 9, junto a su mecanismo focal y en la tabla 2 se indica la fecha, coordenadas del epicentro, profundidad focal, magnitud e intensidad en la escala de Mercalli Modificada (IMM).

Figura 9. Epicentros de los sismos de 1966, 1970, 1974 y 2007, registrados en Perú



Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Ubicación, magnitud e intensidad de los sismos de Perú de 1966, 1970, 1974 y 2007

FECHA	LATITUD	LONGITUD	PROFUNDIDAD FOCAL (KM)	M_B	M_S	M_W	INTENSIDAD IMM
17/10/66	-10,72	-78,70	37	6,5	8,0	8,1	VIII
31/05/70	-9,36	-78,87	64	6,4	7,8	7,9	VIII
3/10/74	-12,50	-77,90	21	6,6	7,8	8,0	VIII
15/8/07	-13,67	-76,76	40			7,9	VIII

Fuente: elaboración propia

Los tres primeros sismos indicados en la Tabla 3, sirvieron de base para definir el espectro de la norma sísmica de Perú de 1997 y el de 2007, que causaron grandes daños en la ciudad de Pisco (Callo, 2001), en su mayor parte en construcciones de adobe. Por esto y considerando su fuente sísmica, se decidió considerarlos para encontrar acelerogramas que sean compatibles con el espectro hallado para Bahía con el modelo de Zhao *et al.* (2006).

En la Tabla 4 se presenta las aceleraciones máximas y mínimas de los registros de los sismos seleccionados, se destaca que estos fueron obtenidos en suelo firme a distancias considerables del epicentro, los tres primeros. El sismo de 2007 se obtuvo en la ciudad de Ica que se encuentra a 180 km del epicentro, sobre un perfil de suelo S3 de acuerdo a la Norma De Perú de 2003 (Aguiar 2010). En la Figura 10 se indican los acelerogramas respectivos.

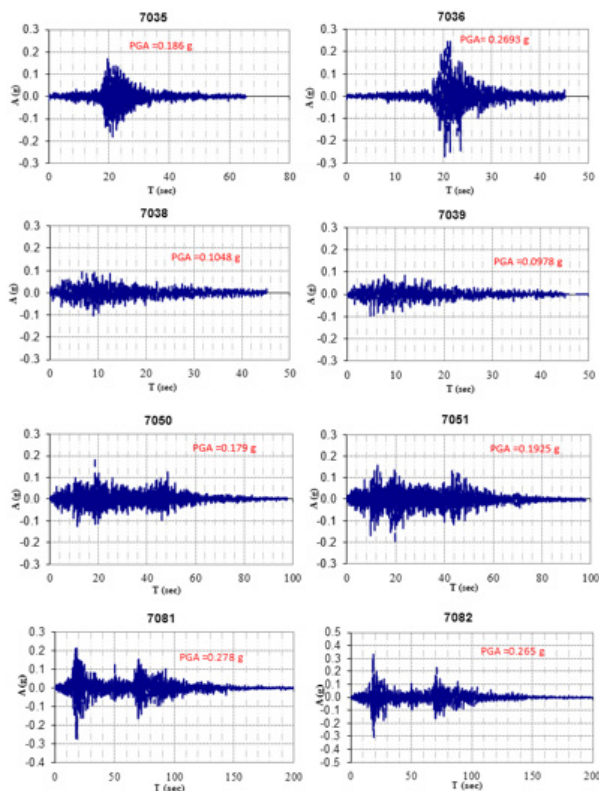
Tabla 4. Aceleración máxima y mínima de los registros considerados en el estudio

REGISTRO	AÑO	A_{max} (GALS)	A_{min} (GALS)	TIEMPO (SEG.)
7035-66	1966	168	181	65,66
7036-66	1966	247	269	65,66
7038-70	1970	93,8	105	45,12
7039-70	1970	91,2	97,8	45,12

7050-74	1974	179	127	97,86
7051-74	1974	159	192	97,86
7081-07	2007	272	260	163,68
7082-07	2007	334	301	163,68

Fuente: elaboración propia

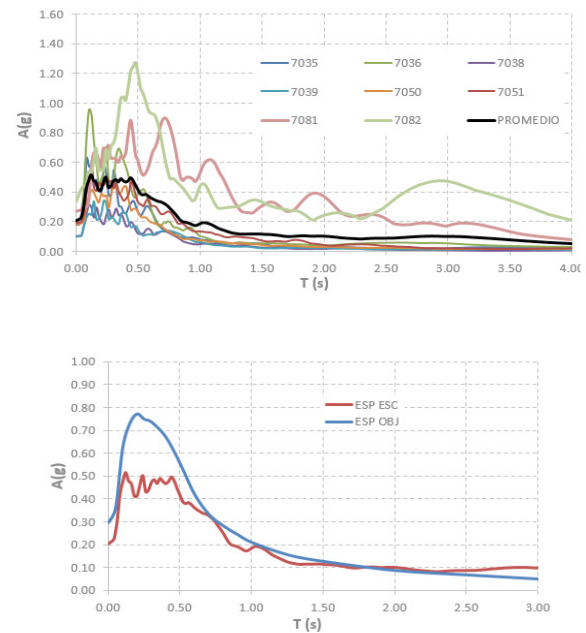
Figura 10. Acelerogramas de los sismos registros considerados en el estudio



Fuente: elaboración propia

A la izquierda de la Figura 11 se presentan los espectros de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento, hallados con los registros indicados en la tabla 3, se indica también el espectro promedio. A la derecha de la Figura 11 se muestran los espectros promedios hallados con los registros y el encontrado con el Modelo de Zhao *et al.* (2006) para Bahía de Caráquez; es a este espectro al que realiza el escalamiento para un rango de interés.

Figura 11. Espectros de sismos de Perú y encontrado con modelo de Zhao *et al.* (2006)



Fuente: Zhao *et al.* (2006)

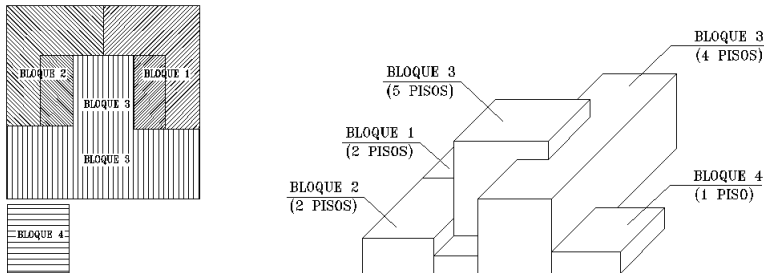
Escalamiento de los acelerogramas

El ASCE 07-10 recomienda que para estructuras convencionales, los acelerogramas deben ser escalados en el siguiente rango de interés: $0,2 T \leq T \leq 1,5 T$; donde T es el período fundamental de vibración. Para estructuras con aisladores sísmicos el rango de interés se encuentra entre $0,5 T_{DBE} \leq T \leq 1,25 T_{MCE}$; siendo T_{DBE} , T_{MCE} , los períodos de vibración de la estructura con aisladores para los sismos de diseño y máximo considerado.

El Hospital Miguel H. Alcívar, antes del sismo, era una estructura convencional de hormigón armado sin muros de corte, compuesta por dos bloques en forma de “L” de 2 pisos; un bloque en forma de “T” de 4 y 5 pisos y un bloque rectangular de 1 piso, como se aprecia en la Figura 12. De tal manera que se trata de una estructura completamente irregular en planta y elevación, cuyos bloques estructurales tienen diferentes períodos de

vibración. Se considera que el período medio de los bloques estructurales es $T = 0,6 \text{ s}$. Por lo tanto el rango de interés es: $0,12 \text{ s} \leq T \leq 0,9 \text{ s}$.

Figura 12. Vista en planta y elevación de los bloques estructurales del Hospital Miguel H. Alcívar



Fuente: elaboración propia

En la Tabla 5 se presentan los pesos considerados que intervienen en la Ecuación (5) para el cálculo del factor F_j y se indica además los períodos asociados. Se destaca que estos valores no son fijos, dependen del rango de interés del escalamiento.

Tabla 5. Períodos y pesos considerados para el escalamiento de sismos

$T_i \text{ (seg)}$	0,2	0,4	0,6	0,8
w_i	0,1	0,3	0,3	0,3

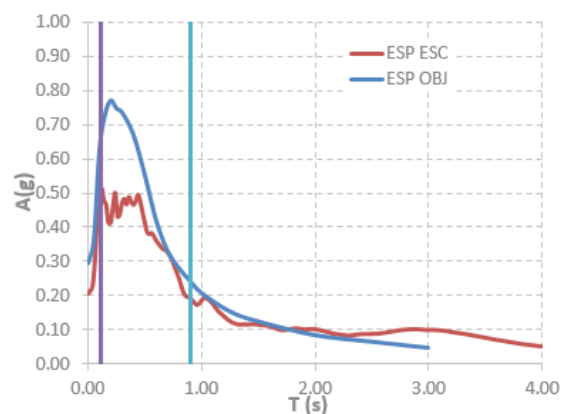
Fuente: elaboración propia

Ya se presentó en el marco teórico del escalamiento de sismos y a la derecha de la Figura 11 se indicó el espectro promedio de los sismos de Perú que se denominó “Espectro a Escalar” y el espectro hallado en el Hospital MHA para el sismo de 1998 que se llamó “Espectro Objetivo”; estos dos espectros se indican a la izquierda de la Figura 13 donde se ha muestra el rango de interés que varía entre 0,12 y 0,9 segundos.

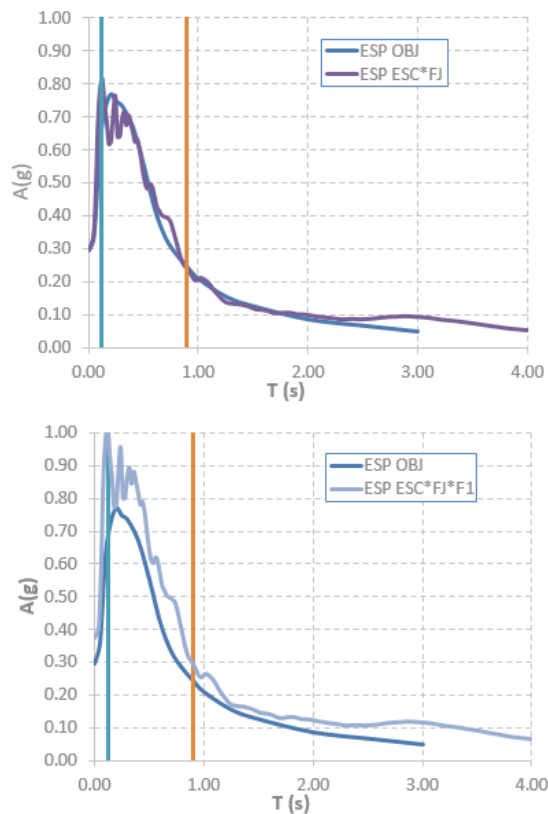
Se calcularon los valores de F_j para cada uno de los sismos de Perú y en la gráfica central de la Figura 13 se tiene el espectro objetivo y el espectro escalado multiplicado por el factor F_j . Se recuerda que el objetivo de este factor es minimizar la diferencia entre el espectro objetivo y el espectro a escalar utilizando para el efecto los pesos y períodos indicados en la Tabla 4. Luego se deben hallar las ordenadas espectrales de los espectros en 0,2, 0,4, 0,6 y 0,8 segundos.

En el rango de interés, todas las ordenadas del espectro escalado multiplicadas por F_j deben ser mayores o iguales a las ordenadas del espectro objetivo; esto casi se logra pero existe un pequeño rango de períodos donde no se cumple por lo que se determinó el factor F_1 con el que se multiplica finalmente el espectro y se tiene la gráfica mostrada a la derecha de la Figura 13. En la Tabla 6 se indica el procedimiento de cálculo en forma resumida.

Figura 13. Escalamiento de registros sísmicos de Perú al espectro objetivo.⁶



⁶A la izquierda se indica el espectro a escalar y el objetivo; al centro el espectro objetivo y el espectro escalado multiplicado por F_j y a la derecha el espectro escalado multiplicado por $F_j F_1$.



En la Tabla 6 se denomina EQ1, EQ2, EQ3 y EQ4 a los sismos de 1966 (Mw 8,1), 1970 (Mw 7,9), 1974 (Mw 8,0) y 2007 (Mw 7,9), respectivamente. En la última fila de la tabla se indica el producto de los factores $F_j F_1$ y en la Figura 14 se presentan los acelerogramas escalados al espectro de respuesta elástica, obtenido en el Hospital MHA para el sismo de 1998, con el modelo de Zhao *et al.* (2006).

En la Tabla 6 se muestran los valores máximos tanto positivos como negativos de los acelerogramas escalados y se aprecia que el valor medio para las aceleraciones positivas es **0,235 g**, y para las aceleraciones negativas es **0,247 g**. Un valor medio de los dos es **0,24 g**.

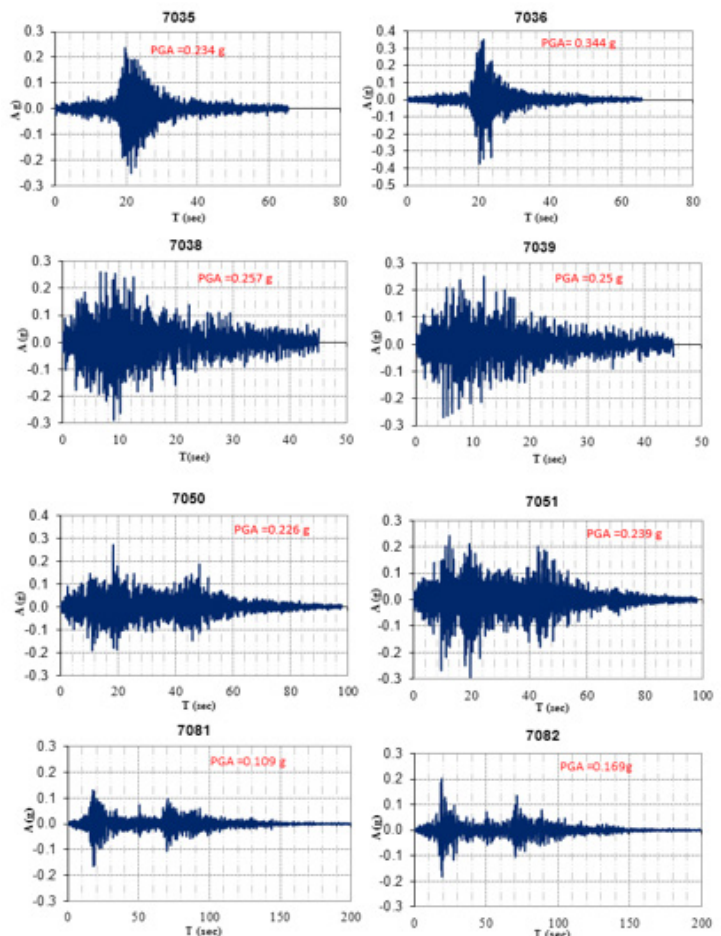
Figura 14. Acelerogramas escalados al espectro del sismo de Bahía de Caráquez en Hospital MHA

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Cálculo de los factores de escalamiento para los sismos de Perú

FACTORES DE ESCALAMIENTO				
	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4
$SD_{ZAHO} t=0,2$	0,770	0,770	0,770	0,770
$S_{FNormal} t=0,2$	0,402	0,201	0,387	0,564
$S_{FParallel} t=0,2$	0,493	0,256	0,445	0,551
$SD_{ZAHO} t=0,4$	0,671	0,671	0,671	0,671
$S_{FNormal} t=0,4$	0,262	0,170	0,435	0,663
$S_{FParallel} t=0,4$	0,565	0,251	0,357	1,018
$SD_{ZAHO} t=0,6$	0,421	0,421	0,421	0,421
$S_{FNormal} t=0,6$	0,276	0,141	0,194	0,621
$S_{FParallel} t=0,6$	0,292	0,114	0,310	0,932
$SD_{ZAHO} t=0,8$	0,282	0,282	0,282	0,282
$S_{FNormal} t=0,8$	0,114	0,102	0,109	0,694
$S_{FParallel} t=0,8$	0,164	0,126	0,212	0,479
F_j	1,114	2,194	1,204	0,473
F_1	1,250	1,250	1,250	1,250
$F_1 F_j =$	1,393	2,743	1,505	0,592

Fuente: elaboración propia



Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Aceleraciones máximas y mínimas de los sismos de Perú escalados

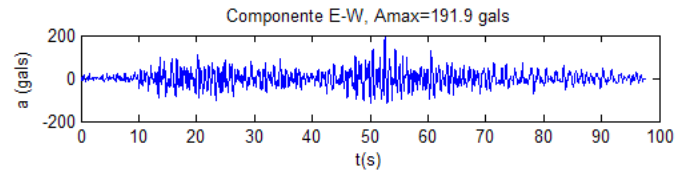
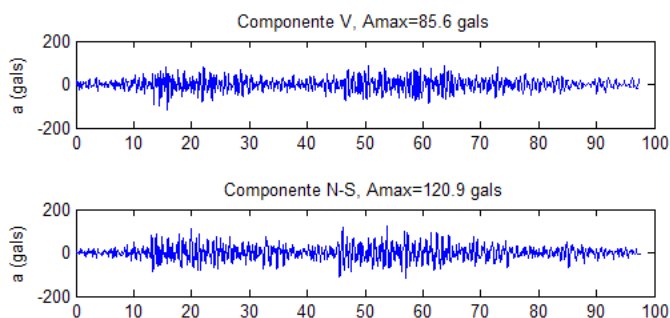
Registro	Amax (g)	Amin (g)
7035	0,234	-0,250
7036	0,344	-0,375
7038	0,257	-0,288
7039	0,250	-0,268
7050	0,226	-0,160
7051	0,239	-0,290
7081	0,130	-0,164
7082	0,202	-0,182
PROMEDIO	0,235	-0,247

Fuente: elaboración propia

Registros del sismo obtenidos en Guayaquil

La red sísmica del Litoral del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería Civil, IIFIUC, registró el sismo de Bahía de Caráquez de 1998 en la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, que se halla aproximadamente a 250 km del epicentro y los acelerogramas obtenidos para las tres componentes: Vertical, Norte-Sur y Este-Oeste que se indican en la Figura 15. Se aprecia que el sismo duró 98 segundos y que la aceleración máxima encontrada para la componente E-W fue de 191,9 gals (**0,2 g**).

Figura 15. Acelerogramas registrados en la Universidad Católica Santiago de Guayaquil del sismo de Bahía de Caráquez del 4 de agosto de 1998. Suelo tipo C



Fuente: Mera W. (2015)

Los acelerogramas indicados en la Figura 15 fueron hallados en suelo tipo C, de acuerdo al NEC-15. Si la aceleración máxima a 250 km del epicentro fue **0,2 g**, en la zona epicentral su valor tiene que ser mayor a este valor. De tal manera que el valor de **0,24 g** encontrado en el Apartado anterior es aceptable.

Conclusiones

El sismo de mayor magnitud registrado en Ecuador en los últimos 25 años⁷ y que causó daño en las estructuras modernas de hormigón armado de Bahía de Caráquez, es el del 4 de agosto de 1998. Por lo tanto, es un sismo muy importante para los estudios de peligrosidad sísmica que se hagan para obras de importancia en Ecuador. En este artículo se ha determinado que las mayores ordenadas espectrales se dan en el rango de períodos cortos, utilizando un modelo de movimiento fuerte, un espectro virtual en el hospital MHA.

Por otra parte, se han obtenido acelerogramas de sismos importantes de Perú, con una fuente tectónica similar al de Bahía de Caráquez, registrados en 1966 (Mw 8,1), 1970 (Mw 7,9), 1974 (Mw 8,0) y 2007 (Mw 7,9). Estos han sido escalados al espectro hallado en Bahía de Caráquez para el sismo de 1998. La metodología empleada puede servir de ejemplo para escalar espectros en otro rango de períodos.

Se da a conocer la existencia de los registros de Guayaquil del sismo de 1998, los cuales pudieran ser utilizados en conjunto con registros de sísmicos

⁷Para el momento de aceptación de este artículo

interplaca registrados en Perú en el análisis no lineal de estructuras. Es importante destacar que estos sismos son de larga duración, con dos fases intensas y que causan daño a considerables distancias del epicentro.

Referencias bibliográficas

- Abrahamson N., Silva W. & Kamai R. (2014), "Summary of the ASK14 ground motion relation for active cristal regions", *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1025-1055
- Aguiar R. (2010), "Análisis de tres sismos interplaca tipo thrust registrados en: Chile 2010, Perú 2007 y Ecuador 1998" *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, ASAE, 7 (2), 74-104.
- Aguiar R., Romo M., Torres M. y Caiza P. (2008), *El sismo de Bahía*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 125 p. Quito, Ecuador
- American Society of Civil Engineers ASCE. (2010). *ASCE/SEI-7-10 Minimum Design Loads for Buildings*, Reston V.A.
- Borzognia Y., & Campbell K., (2013), *BC13: Ground Motion Model for the Vertical Component of PGA, PGV, and Pseudo-Acceleration Response Spectra*, Chapter 2. NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions, 85-126, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Campbell K. & Borzognia Y. (2014), "NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra", *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1087-1115
- Callo F., (2001), *Estimación de M_w a partir de isosistas de Intensidad Máxima, para sismos de subducción ocurridos en Perú*. Instituto Geofísico del Perú. Centro Nacional de datos geofísicos, 38 p., Lima.
- CEC-2000, *Código Ecuatoriano de la Construcción*, XIII Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 325-350, Quito, Ecuador.
- Chiou, B. S.-J & Youngs, R.R. (2014), "Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra" *Earthquake Spectra*, 30 (3), 1117-1153.
- Chunga, K., Aguiar, R., Zambrano S., Quiñonez M.F., y Galarza J. (2016). "Caracterización de fallas geológicas capaces de generar terremotos corticales en la costa sur del Ecuador". *Boletín de Geología*. ISSN: 0120-0283.
- Gulerce, A., Kamai, R., Abrahamson N. & Silva W. (2013), *GKAS13: Ground Motion Prediction Equation for the Vertical Ground Motion Component*, Chapter 2. NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions, 3-49, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Mera, W., (2015), *Acelerogramas registrados en Guayaquil del sismo del 4 de agosto de 1998*, (inédito)
- Michetti, A.M., Esposito, E., Guerrieri, L., Porfido,

S., Serva, L., Tatevossian, R., Vittori, E., Audemard, F., Azuma, T., Clague, J., Comerchi, V., Gürpınar, A., McCalpin, J., Mohammadioun, B., Mörner, N.A., Ota, Y., Rogozhin, E. (2007). La Scala di Intensità ESI 2007, ed. L. Guerrieri e. Vittori (Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, vol.74, Servizio Geologico d'Italia – Dipartimento Difesa del Suolo, APAT), Roma, http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/-INQUA_Scale/.

in Japan using site classification based on predominant period”, *Bulletin of Seismological Society of America*, 96 (3), 898-913.

Pedoja, K., Dumont, J.-F., Lamothe, M., Ortlieb, L., Collot, J.-Y., Ghaleb, B., Auclair, M., Alvarez, V., & Labrousse, B., (2006), “Plio-Quaternary uplift of the Carnegie Ridge, central coast of Ecuador”. *Journal of South American Earth Sciences*, 22, 1-21.

Reyes J.C. & Kalkan E., (2012), “How many records should be used in an ASCE/SEI-7 ground motion scaling procedures?” *Earthquake Spectra*, 28 (3), 1223-1242.EERI.

Segovia, M., Yepes, H., Pacheco, J., Shapiro, N. y Egred, J. (2004), “Patrones sísmicos y el terremoto de Bahía en la zona de subducción ecuatoriana”, *Investigaciones en Geociencia*, Vol. 1, 87-93.

Stewart, J., Seyhan, E., Boore, D. & Atkinson, G., (2013), *SSBA13: Vertical Component Ground Motion Prediction Equations for Active Crustal*, Chapter 3. NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions, 51-84, Pacific Earthquake Engineering Research Center.

Zhao, J., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T & Fukushima, Y., (2006), “Attenuation relations of strong ground motion