

# Aplicación de dos modelos de atenuación a la falla La Cal, Mendoza, Argentina

Roberto Aguiar Falconí\*

Magaly Quishpe\*

Daissy Quishpe\*

Carlos Frau\*\*

Miguel Tornello\*\*

## Abstract

A fundamental element of probabilistic, as well as deterministic, seismic risk analysis is the capacity to estimate, for an established site, the movement of the terrain that could take place in future earthquakes based on a set of seismological parameters. This estimate is obtained by using attenuation relations or laws. The Next Generation Attenuation of Ground Motion (NGA) Project was a research initiative of the Pacific Earthquake Engineering Research Center-Lifelines Program (PEER-LL) together with the USGS and the Southern California Earthquake Center (SCEC), whose objective was to develop updated empirical attenuation models by means of an exhaustive and highly interactive research program. This paper uses two of the NGA models to evaluate the response spectra in the proximity of the La Cal seismic fault, very close to the urban center known as Gran Mendoza in the Republic of Argentina. The models used are Abrahamson and Silva, as well as Campbell and Bozorgnia, published in 2008. Results obtained were compared to the design spectra of the Argentinean norm, and reached the conclusion that the Campbell and Bozorgnia model present a better fit. This study also infers that design spectra of the Argentinean norm are appropriate for the case under study.

Key words: *Attenuation models, acceleration spectra, La Cal fault.*

## Resumen

Un elemento esencial, tanto para los análisis de riesgo sísmico probabilísticos como determinísticos es la capacidad para estimar en un sitio establecido el movimiento del terreno que puede ocurrir en futuros terremotos a partir de un conjunto de pará-

\* Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército Sangolquí, Ecuador, correo electrónico: raguiar@espe.edu.ec

\*\* Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTec), Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, correo electrónico: cdfrau@frm.utm.edu.ar

metros sismológicos. Esta estimación se realiza usando relaciones o leyes de atenuación. El *Next Generation Attenuation of Ground Motion (NGA) Project* fue una iniciativa de investigación del *Pacific Earthquake Engineering Research Center-Lifelines Program (PEER-LL)* en conjunto con el USGS y el *Southern California Earthquake Center (SCEC)*, cuyo objetivo fue desarrollar modelos de atenuación empíricos actualizados mediante un exhaustivo y altamente interactivo programa de investigación. En el presente trabajo se utilizan dos de los modelos NGA para evaluar los espectros de respuesta en la proximidad de la falla sísmica La Cal, muy próxima al conglomerado urbano denominado Gran Mendoza en la República Argentina. Los modelos utilizados son el de Abrahamson y Silva y el de Campbell y Bozorgnia publicados en 2008. Los resultados obtenidos se comparan con los espectros de diseño de la norma argentina con la conclusión de que el Modelo de Campbell y Bozorgnia presenta un mejor ajuste. Se desprende también del presente estudio que los espectros de diseño de la norma argentina resultan adecuados para el caso estudiado.

Palabras claves: *modelos de atenuación, espectros de aceleraciones, falla La Cal.*

## Introducción

Un elemento esencial, tanto para los análisis de riesgo sísmico probabilísticos como determinísticos es la estimación en un sitio establecido del movimiento del terreno que puede ocurrir en futuros terremotos. Esta estimación se realiza usando relaciones de movimiento, también conocidas como “relaciones o leyes de atenuación”. Una relación de atenuación es una ecuación matemática que relaciona un parámetro del movimiento del suelo a uno o más parámetros de la fuente sísmica, al camino que recorren las ondas y a las condiciones locales del sitio. Así, se distinguen por un lado los parámetros del movimiento del suelo que asumen la función de variable dependiente, es decir son el resultado de la aplicación de una relación de atenuación y por el otro los parámetros de la fuente sísmica, la distancia y las condiciones locales del suelo que son referidos colectivamente como “parámetros sismológicos” y variables independientes.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) utiliza relaciones de atenuación para confeccionar sus mapas de riesgo sísmico. Para actualizar los mapas de diseño sísmico en la edición 2009 del National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP): *Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures* utilizó las relaciones de Boore and Atkinson (2008), Campbell and Bozorgnia (2008) y Chiou and Youngs (2008), tanto para los análisis de riesgo sísmico probabilístico como para establecer límites determinísticos de la demanda sísmica en regiones *near-fault* (Huang *et al.*,

2008). Para obtener nuevas y confiables relaciones de atenuación llevó adelante el proyecto *Next Generation Attenuation of Ground Motion (NGA) Project* el cual fue una iniciativa de investigación del *Pacific Earthquake Engineering Research Center-Lifelines Program* (PEER-LL) en conjunto con el USGS y el *Southern California Earthquake Center* (SCEC), cuyo objetivo fue desarrollar modelos de atenuación empíricos actualizados mediante un exhaustivo y altamente interactivo programa de investigación.

Dentro del marco descrito, nuevos y mejores modelos de atenuación fueron desarrollados sobre una expandida y actualizada base de datos de registros, incluyendo simulaciones teóricas del 189 movimiento en roca, respuesta del sitio en suelo, efectos de cuenca y así, dar mejores bases científicas para la evaluación de formas funcionales y restricciones sobre los modelos de atenuación del movimiento del suelo debida a terremotos. En el proyecto participaron cinco equipos de investigadores que habían desarrollado relaciones de atenuación previas al proyecto: Abrahamson, Silva, Boore, Campbell-Bozorgnia y Youngs-Idris (representando a Sadigh). Para cubrir las necesidades de la práctica de diseño en ingeniería sísmica los modelos debían contemplar: a) parámetros del movimiento del suelo tales como la aceleración, la velocidad y el desplazamiento máximos del suelo (PGA, PGV, PGD), aceleración espectral para respuesta elástica con 5% de razón de amortiguamiento dentro de un rango de periodo comprendido entre 0 y 10 segundos; b) terremotos corticales superficiales provenientes de fallas transcurrentes, inversas, normales, c) magnitud momento con rango entre 5.0 y 8.5, d) distancia a la fuente con rango entre 0 y 200km y e) esquema de clasificación de suelos usada más frecuentemente, incluyendo la clasificación del NEHRP.

Los principales aspectos técnicos incorporados en los modelos fueron: a) efecto de bloque levantado (*hanging wall*) y bloque deprimido (*foot wall*) presente en fallas del tipo normal o inversa, b) estilo del fallamiento sismogénico según sean fallas transcurrentes, inversas, normales u oblicuas, c) profundidad del fallamiento contemplando ruptura con afloramiento superficial y subterránea, d) salto de tensión estático computado a través del área de ruptura, e) efectos de amplificación debida a las condiciones locales del suelo en relación a la condición "roca", f) amplificaciones debidas a la profundidad del basamento rocoso (efecto cuenca 3D) o bien a la presencia de roca superficial. Para el análisis de los datos los autores consideraron aspectos tales como la incertidumbre en las variables predictivas; la falta de datos en las variables predictivas y la dependencia de los errores estándares sobre la magnitud, distancia y tipo de suelo. Los resultados del proyecto NGA fueron una serie de relaciones de atenuación que cada grupo de investigadores desarrolló separadamente.

De los cinco modelos desarrollados, para el presente estudio se adoptaron dos modelos: a) Abrahamson y Silva (A-S), 2008 y b) Campbell y Bozorgnia (C-B),

2008. Los motivos que llevaron a esta elección fueron en primer lugar que los autores seleccionados llevan adelante desde antes de 1997 líneas de investigación orientadas al estudio de los efectos en zonas cercanas a la fuente sísmica (*near-fault*). Por lo tanto se considera que el conocimiento en este campo se encuentra reflejado en dichos modelos resultando más adecuados para estudios centrados en la demanda sísmica de sitio muy próximos a la fuente sísmica. Así mismo, sus variables predictivas presentan mayor similitud con los datos disponibles del caso que trata el presente trabajo debido a que la base de datos de registros utilizadas se adecuaban mejor a los objetivos buscados por los autores. Sobre este último aspecto se puede citar que las bases de datos utilizadas por A-S y C-B sólo contienen registros de terremotos corticales (superficiales) ocurridos en regiones tectónicamente activas; no consideraron registros en los que no se contara con información sobre la velocidad de la onda de corte en los primeros 30m o se desconociera el mecanismo focal. Se descartaron los registros que mostraban la presencia de efectos especiales (p.e. efecto de cuenca) o bien que contaban con una sola componente horizontal. Por último, no se incluyeron aquéllos registros que no fueran de campo libre. En cuanto a las diferencias entre ambas bases de datos resultó de interés contrastar los modelos de atenuación de C-B que no utilizó registros de sismos premonitores ni de réplicas, en tanto que A-S sí lo hizo.

La sismicidad de la República Argentina presenta en las zonas de mayor peligrosidad sísmica una distribución de fallas activas muy próximas a grandes centros urbanos. Por sus antecedentes sísmicos y por sus características geotectónicas regionales, la zona del centro-oeste argentino es la de mayor peligro, especialmente la provincia de San Juan y el norte de la provincia de Mendoza. Surge la necesidad de investigar y cuantificar los niveles de acciones sísmicas para potenciales terremotos en las inmediaciones de aquellas fallas sismogénicas que tienen asociados altos niveles de riesgo debido a la presencia muy cercana de centros o conglomerados urbanos. En esta dirección, el presente trabajo se focaliza en el caso particular de la falla La Cal en la Provincia de Mendoza de la República Argentina.

Una de las herramientas más utilizadas para el proyecto de estructuras sismorresistente son los espectros de respuesta elástica o de diseño, asociados a una razón de amortiguamiento de 5% respecto del amortiguamiento crítico. Es por tanto que se propone en este estudio obtener, para el entorno a la falla La Cal, espectros de respuesta de pseudo-aceleración elástica mediante las metodologías propuestas por Abrahamson y Silva, 2008 y la de Campbell y Borzognia, 2008. Refuerza el interés en llevar adelante la presente investigación el hecho de que la normativa sísmica argentina dividen al país en sólo cinco extensas zonas sísmicas (0, 1, 2, 3 y 4) siendo la zona 4 de muy elevada peligrosidad sísmica. Para cada zona sísmica se definen espectros de respuesta sin tener en cuenta las condiciones particulares que pueden generar la presencia de fallas sísmicas en cada sitio. Así, los resultados

obtenidos pueden ser de utilidad a fin de contrastarlos con los espectros de diseño que establece la norma argentina para la zona geográfica de la Ciudad de Mendoza que es afectada por la falla La Cal.

**Métodología de Abrahamson y Silva (a-s)**

La base de datos con la cual trabajaron (A-S) para determinar las leyes de atenuación contempló 135 terremotos entre los años 1952 y 2002, con 2,754 registros de sismos premonitores, principales y réplicas; la mayor parte corresponde al área de California (Estados Unidos) sin embargo, hay un número importantes de registros sísmicos ocurridos en otras regiones del mundo. Los sismos seleccionados corresponden a terremotos superficiales, también denominados corticales, es decir que se generan en la corteza terrestre. Los mecanismos focales corresponden a los distintos tipos de fallas presentes en este tipo de ambientes tectónicos: fallas transcurrentes (*strike-slip fault*), inversas (*reverse fault*), normales (*normal fault*) o una combinación de las transcurrentes con las otras dos (*oblique fault*) cuya profundidad focal no supera los 30km (Lay and Wallace, 1995).

Puede llamar la atención que en la base de datos no se informen eventos sísmicos que hayan ocurrido en América del Sur; esto puede ser posible debido a la escasez de registros en Sudamérica que cumplieran con la condiciones adoptadas por Abrahamson y Silva, es decir, pertenecer a un evento sísmico del tipo cortical (no subductivo), tener magnitud moderada, ubicarse la estación registradora a menos de 200km del epicentro, contar con todas las componentes, disponer del registro completo que permita su adecuado procesamiento.

La ecuación general propuesta por (A-S) para encontrar el espectro de aceleración como una fracción de la gravedad  $Sa(g)$  se indica en la ecuación (1). El valor que arroja la ecuación corresponde a la media geométrica según Boore *et al.* (2006).

$$\ln Sa(g) = f_1(M, R_{rup}) + a_{12}F_{RV} + a_{13}F_{NM} + a_{15}F_{AS} + f_5(PGA_{1130}, V_{530}) + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_s, W, \delta, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_8(R_{rup}, M) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{530}) \quad (1)$$

Donde:

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

$F_{RV}$  variable indicadora que representa fallas inversas e inversas-oblicuas con ángulo Rake entre 30 y 150 grados.

$F_{NN}$  variable indicadora para fallas normales y normales-oblicuas con ángulo *rake* entre -150 y -30.

$F_{AS}$  variable idicadora de una réplica o del evento sísmico principal.

$f_5(PGA_{1100}, V_{S30})$  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 Walling *et al.* (2008).

$F_{HW}$  variable indicadora para sitios sobre el bloque levantado (*hanging wall*) (Figura 2).

$f_4(R_{JB}, R_{rup}, R_x, W, \delta, Z_{TOR}, M)$  función que toma en cuenta el efecto de bloque levantado (*hanging wall*).

$f_6(Z_{TOR})$  función que toma en cuenta la profundidad del techo de la ruptura cósmica (Figura 1).

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

$f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30})$  función que toma en cuenta el tipo de suelo del sitio de interés.

Siendo  $M$  la magnitud momento;  $R_{rup}$  la distancia más cercana al plano de ruptura en km (Figura 2);  $PGA_{1100}$ , la aceleración máxima del suelo en roca con  $V_{1.0} = 1100 \text{ m/s}$  y  $V_{S30}$  la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad del sitio de interés en m/s;  $R_{JB}$  la distancia mínima horizontal a la proyección horizontal del área de ruptura en km;  $R_x$  la distancia horizontal desde el borde de la ruptura al sitio de interés (Figura 1);  $W$  el ancho del área de ruptura;  $\delta$  ángulo de inclinación o buzamiento del plano de falla;  $Z_{TOR}$  profundidad del techo de la ruptura cósmica (Figura 1);  $Z_{1.0}$  la profundidad en la cual se tiene una velocidad de onda de corte de  $V_2 = 1000 \text{ m/s}$ ;  $V_{S30}$  la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30m de profundidad; en tanto que 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. Los coeficientes  $a_{ij}$  son los coeficientes de ajuste del modelo que son función del parámetro a calcular y para el caso de ordenadas espectrales varían para cada uno de los periodos seleccionados. Para más detalles del modelo se remite a Abrahamson and Silva (2008).

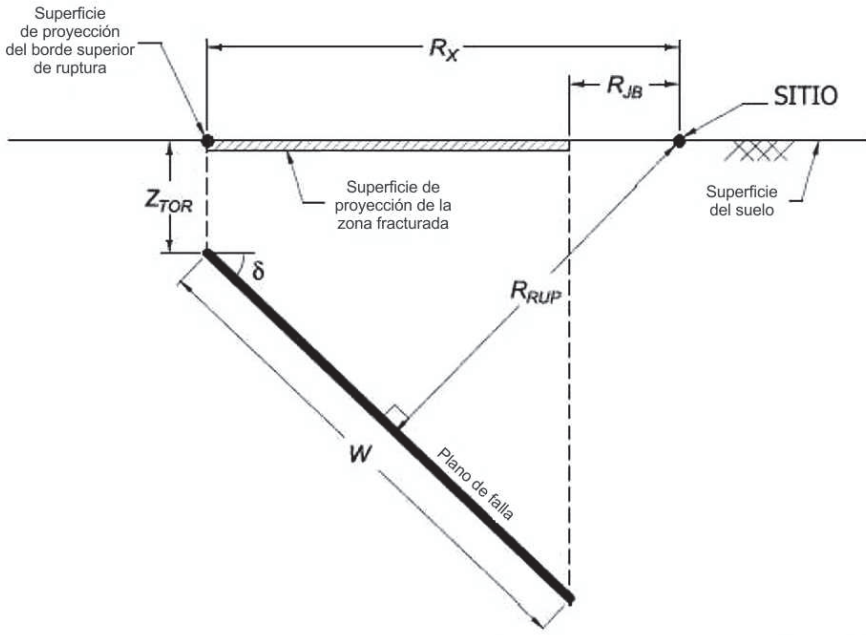


Figura 1. Variables de distancia y angular que intervienen en los modelos de A-S y C-B.

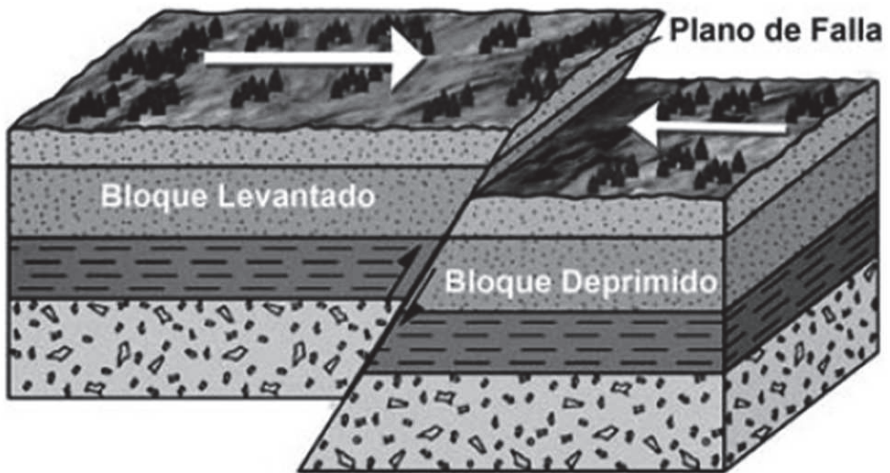


Figura 2. Bloque levantado (*hanging wall*) y deprimido (*foot wall*). Yeats *et al.* (1997).

### Métodología de Campbell y Bozorgnia (c-b)

La base de datos considerada por C-B coincide en su mayor parte con la base de datos de A-S, pero solo considera los eventos principales excluyendo los premonitores y replicas. La ecuación general propuesta por (A-S) para encontrar el espectro de aceleración como una fracción de la gravedad  $Sa(g)$  se indica en la ecuación (2). El valor que arroja la ecuación corresponde a la media geométrica según Boore *et al.* (2006).

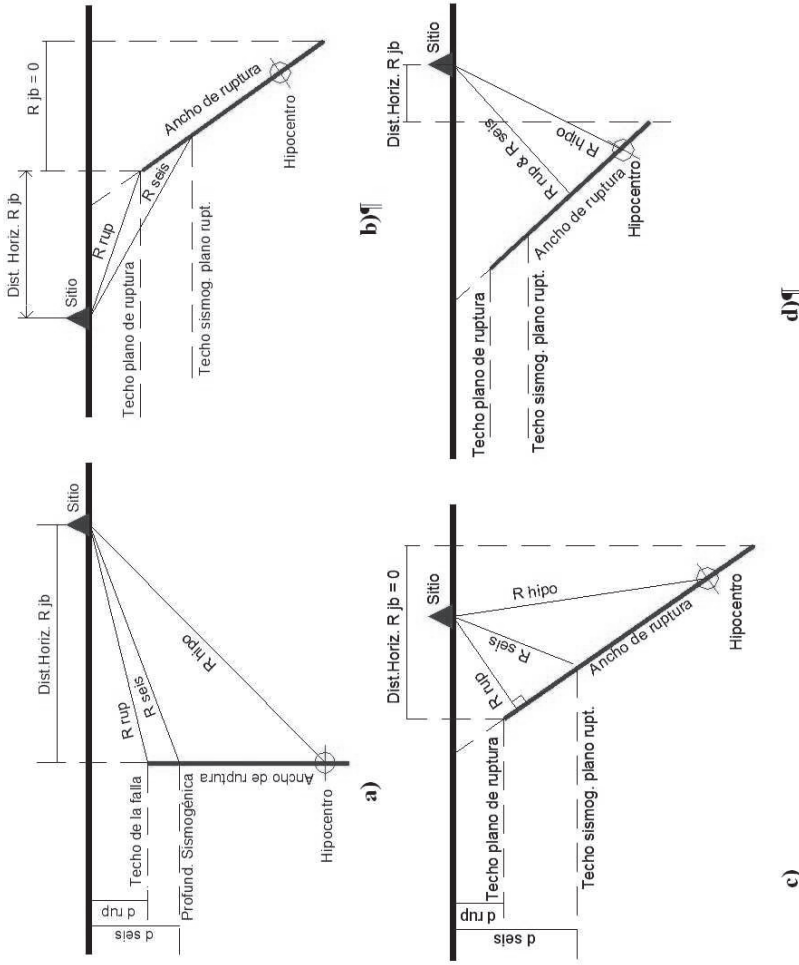
$$\ln Sa(g) = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} \quad (2)$$

Donde:

- $f_{mag}$  función dependiente de la magnitud.
- $f_{dis}$  función dependiente de la distancia de la fuente al sitio.
- $f_{flt}$  función dependiente del tipo de falla.
- $f_{hng}$  función dependiente del efecto bloque levantado (*hanging wall*).
- $f_{site}$  función dependiente de las condiciones lineales y no lineales del suelo.
- $f_{sed}$  función es dependiente del sedimento superficial y efecto de cuenca 3D.

Los parámetros que intervienen en las distintas funciones son:  $M$  la magnitud momento;  $R_{rup}$  la distancia más cercana al plano de ruptura en km (Figura 2);  $A_{1100}$ , la aceleración máxima del suelo en roca con  $V_{100} = 1100$  m/s;  $V_{30}$  la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad del sitio de interés en m/s;  $R_{jb}$  la distancia mínima horizontal a la proyección horizontal del área de ruptura en km;  $F_{RV}$  variable indicadora que representa fallas inversas e inversas-oblicuas con ángulo Rake entre 30 y 150 grados;  $F_{NM}$  variable para fallas normales y normales oblicuas con ángulo Rake entre  $150^0$  y  $0^0$ ;  $W$  el ancho del área de ruptura;  $\delta$  ángulo de inclinación o buzamiento del plano de falla;  $Z_{TOR}$  profundidad del techo de la ruptura cosísmica (Figura 1);  $Z_{1.0}$  es la profundidad en la cual se tiene una velocidad de onda de corte de  $V_s = 1000$  m/s;  $Z_{2.5}$  profundidad del horizonte rocoso que presenta una velocidad de la onda de corte de 2.5km/s; en tanto que 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. El modelos presenta coeficientes  $a_{ij}$  y  $k_i$  que son coeficientes de ajuste del modelo. Para más detalles del modelo se remite a Campbell y Bozorgnia (2008).





**Figura 3.** Medidas de distancia a la fuente finita más frecuentemente usadas en relaciones de atenuación: a) sitio próximo a falla con inclinación de  $90^\circ$  (plano de falla vertical), b) sitio ubicado en el bloque deprimido (*foot wall*) de falla inversa, c) sitio sobre la proyección del plano de falla y d) sitio en el bloque levantado (*hanging wall*) de falla inversa y fuera de la proyección del plano de falla.

En la Figura 1 se encuentra el significado de  $R_{RUP}$ ,  $R_{1B}$ ,  $Z_{TOR}$ , luego en la Figura 3 se presentan estas variables relacionadas con cuatro casos de interés y tipos de falla. La Figura 3 tiene un carácter más específico y puede ofrecer una mejor ayuda, en ella se ha denominado  $A_{RUP}$  a la variable  $Z_{TOR}$ .

En ambos modelos (ecuación 1 y 2) en lugar de  $Sa(g)$  se podría haber escrito  $\ddot{Y}$ . En este caso  $\ddot{Y}$  puede representar la aceleración máxima horizontal del suelo (PGA), o bien la máxima velocidad horizontal del suelo (PGV) o el máximo desplazamiento horizontal del suelo (PGD); para cada caso se dispone de un conjunto de coeficientes específicos.

$$f_{tsd} = \begin{cases} c_{11}(Z_{23} - 1); & \Rightarrow Z_{23} < 1 \\ 0; & \Rightarrow 1 \leq Z_{23} \leq 3 \\ c_{12} K_2 e^{-0.73} [1 - e^{0.23(Z_{23}-3)}] & \Rightarrow Z_{23} > 3 \end{cases}$$

**Falla La Cal**

En la República Argentina las zonas de fallamiento geológico se manifiestan claramente con desplazamientos de cadenas montañosas, alineaciones de centros volcánicos y formación de valles transversales a las estructuras de fallas (Costa *et al.*, 2000). A la luz de la teoría de la tectónica de placas, se ha considerado generalmente al borde continental oeste de Sudamérica como parte de la zona de subducción correspondiente a la placa de Nazca en su encuentro con la placa Sudamericana. El proceso en el cual la corteza oceánica, ubicada inmediatamente bajo el Océano Pacífico, se desplaza debajo de las rocas continentales de Sudamérica, ha dado lugar a los principales rasgos estructurales como el complejo de fallamientos, plegamientos y ascensos de rocas del basamento denominado Cordillera de Los Andes.

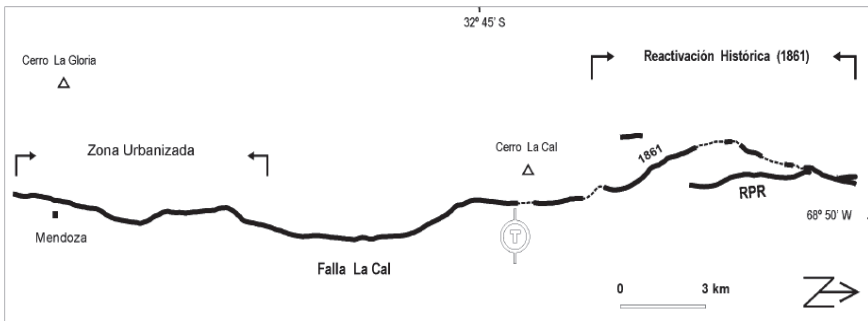
El desplazamiento horizontal de la placa de Nazca a una tasa de corrimiento promedio de 63mm/año frente a los 13mm/año que lo hacen puntos interiores de la placa Sudamericana, es la principal causa de la deformación cuaternaria en Argentina. El resultado es un esquema compresivo con elevación de la mayoría de las estructuras cuaternarias conocidas en el país. La cordillera de Los Andes, la cual se extiende por más de 4000km; constituye la columna vertebral tectónica y es aquí donde se concentran las principales deformaciones más recientes.

La provincia de Mendoza se ubica en el centro-oeste de la República Argentina, al pie de la cordillera de Los Andes. Pertenece a la unidad geológica denominada “Precordillera” que se caracteriza por pliegues elevados por empuje que constituyen las estribaciones de Los Andes entre los paralelos 29°S y 33°S. Al sur del paralelo 32°S las deformaciones cuaternarias están representadas principalmente por bloques compresionales ciegos y emergentes provenientes de fallas inversas que pueden

presentar alto ángulo en superficie pero tienden a horizontalizarse en profundidad. Este fenómeno se supone ocurre entre los 6 y 8km bajo la superficie. El terremoto mendocino del 20 de marzo de 1861, con la falla La Cal como fuente sismogénica (Mingorance, 2001) marca el inicio de una serie de eventos sísmicos que afectaron a las provincias de San Juan y Mendoza.

La falla La Cal se ubica al norte de la provincia de Mendoza, su extremo sur penetra francamente en la Ciudad Capital, la cual está rodeada por los Departamentos de Guaymallén, Las Heras, Godoy Cruz, Maipú y Luján de Cuyo; este conglomerado urbano se lo denomina “Gran Mendoza” y alberga a más de un millón de habitantes.

La Figura 4 muestra la traza y ubicación de la falla La Cal. De acuerdo con Mingorance (2001) la falla La Cal fue la generadora del terremoto de Mendoza del 20 de marzo de 1861 con una intensidad máxima estimada que alcanzó los IX grados en la escala Mercalli Modificada; estudios de sismicidad histórica le asignan una magnitud de 7.0 Richter.



**Figura 4.** Falla La Cal (Mingorance, 2001).

Valiosos relatos de la época fueron recopilados por la Junta de Estudios Históricos de Mendoza en su revista de 1938, vol. X titulada “El terremoto del 20 de marzo de 1861”; estos relatos aportan interesantes datos, dando cuenta del carácter impulsivo y de la polarización del movimiento en la dirección oeste-este que presentó este terremoto. A continuación extractamos un relato por demás elocuente.

La tierra se movía como mecida por una mano poderosa. Los edificios oscilaban de este a oeste... una estampa pendiente de un clavo en la pared, que estaba de oriente a poniente, oscilaba en esa dirección. Lo que no se habría verificado si el movimiento hubiera sido en otro sentido, porque la estampa hacia las veces de péndulo que sólo podía oscilar en una sola manera... los que pudimos fijar nuestra atención en los

muebles que saltaban sobre el pavimento de las habitaciones. La ola terrestre, haciendo pasar la superficie plana del terreno a la curva, desplomó primero hacia el Este los edificios y después los movió horizontalmente en la misma dirección, pero elevándolos. Las murallas perpendiculares a la dirección del movimiento cayeron alternativamente al Oeste y al Este, mientras que las que se hallaban colocadas paralelamente, o en el sentido del movimiento, se rasgaron de alto abajo. Advertiré que las calles de Norte a Sur..., fuesen las que más se obstruyesen por los escombros, porque sus murallas laterales eran casi perpendiculares a la dirección del movimiento. He tenido después la satisfacción de ver comprobada esta conclusión, por las observaciones simétricas,... que practiqué durante ocho meses de mi residencia en la ciudad destruida. Todos los temblores notables fueron de movimiento oscilatorio u ondulatorio de Oeste-Suroeste a Este Noreste” (Franklin Villanueva).

Para el presente trabajo resulta de gran relevancia la determinación del Terremoto Potencial Máximo (TPM) que puede presentarse en torno a la falla La Cal. El TPM se define como el mayor terremoto que es capaz de generar una fuente sismogénica; es evaluado en términos de magnitud que en este caso se la designa como Magnitud Máxima Capaz (MMC). Las definiciones de TPM o MMC dadas precedentemente no involucran un periodo de tiempo determinado, por lo que se dice que son valores determinísticos que responden a la potencialidad física de la falla para generar terremotos y no a su recurrencia.

En este estudio, la determinación de la MMC se realizó mediante la aplicación de relaciones empíricas que vinculan parámetros geométricos de las fallas con la magnitud y tomando como límite inferior el mayor terremoto histórico conocido asociado a la falla en estudio. Para ello se aplicaron las relaciones empíricas de Wells y Coppersmith (1994) en función de la longitud de ruptura superficial (ecuación 3); donde  $M$  es la magnitud momento, y  $L_{RS}$  es la longitud de ruptura sub-superficial. La medida en profundidad del área de ruptura, perpendicular a la longitud es el ancho de ruptura  $W$ . El largo y ancho de la falla conforman el área de ruptura y reviste gran interés para cuantificar los espectros de respuesta. Para determinar  $W$  se aplicó la ecuación 4 de Wells and Coppersmith (1994) donde  $M$  es la magnitud momento y  $W$  es el ancho de ruptura en km. Los demás parámetros geológicos se resumen en la Tabla 1.

$$M = 5.0 + 1.22 \cdot \log L_{RS} \quad (3)$$

$$\log W = -1.61 + 0.41M \quad (4)$$

De acuerdo a los datos de la Tabla 1, los parámetros a emplear en los modelos descritos son los siguientes:  $F_{RV} = 1$ ;  $F_{NW} = 0$ ;  $Z_{TOR} = 0.5 \text{ km}$ ;  $Z_{2.5} = 0.2 \text{ km}$ ;  $Z_{0.1} = 0.2 \text{ km}$ .

**Tabla 1**  
**Parámetros sismológicos de la falla La Cal (Costa *et al.*, 2000; Frau, 2009)**

**Falla La Cal**

Ubicación: Cerro La Cal, Dpto. Las Heras, Prov. Mendoza					
Long. Acum. 30.7 km	Mag=f(L) 6.8	Terremoto Histórico 20-03-1861# M=7.0		Mmáx Adop. 6.8	Ancho W 15.4km
Ambiente Geológico: Localizada en el piedemonte del sector más austral de la Precordillera					
Intervalo de recurrencia		1300 años	Tasa de Movimiento:		1-5 mm/año
Clasificación Importancia:		A	Tipo de Falla:		Inversa
Rumbo: N8°E	Inclinación δ: 45°W		Strike λ: 90°		
Observaciones: (* ) Dado que la estimación de la magnitud histórica está basada exclusivamente en relatos históricos se adoptó la obtenida s/Wells y Coppersmith. #Según Mingorance, 2001.					

En cuanto a los sitios en donde se calcularán los espectros se remite a la Figura 5 (Frau, 2009). La parte superior muestra un esquema de la sección transversal de la falla La Cal, mostrando el plano de falla y el horizonte terrestre. En primer lugar, se identifica una zona denominada “Distancia Cero” (S0) que coincide con la proyección sobre la superficie terrestre del plano de ruptura hasta una profundidad de 10 km (UBC-97). A partir de los límites de la zona S0 se definen 3 nuevas distancias separadas 5km cada una. En la parte inferior de la Figura 5 se representa la traza de la falla vista en planta y la línea que delimita la zona de “Distancia Cero” y a continuación las líneas “paralelas” a la traza correspondientes a distancias 5, 10 y 15km, estas últimas referidas a la zona “Distancia Cero”. De esta manera, se generan tres nuevas zonas S1, S2 y S3 sobre el lado del “Bloque levantado” y otras tres sobre el lado del “bloque deprimido”.

A los fines de este estudio se determinaron los espectros de respuesta de pseudo-aceleración elástica de acuerdo a los modelos descritos en sitios ubicados en coincidencia con las líneas que separan entre si las zonas S0, S1, S2 y S3 que se corresponden con distancias: D=0; D=5; D=10 y D=15km Figura 5. En la Tabla 2, se indican los datos de distancia y PGA que surgen o se requieren para encontrar los espectros en los sitios seleccionados. Para el caso del modelo de A-S, el valor de  $R_x$  se halla aplicando la ecuación  $R_x = 10.89 + R_{T2}$ .

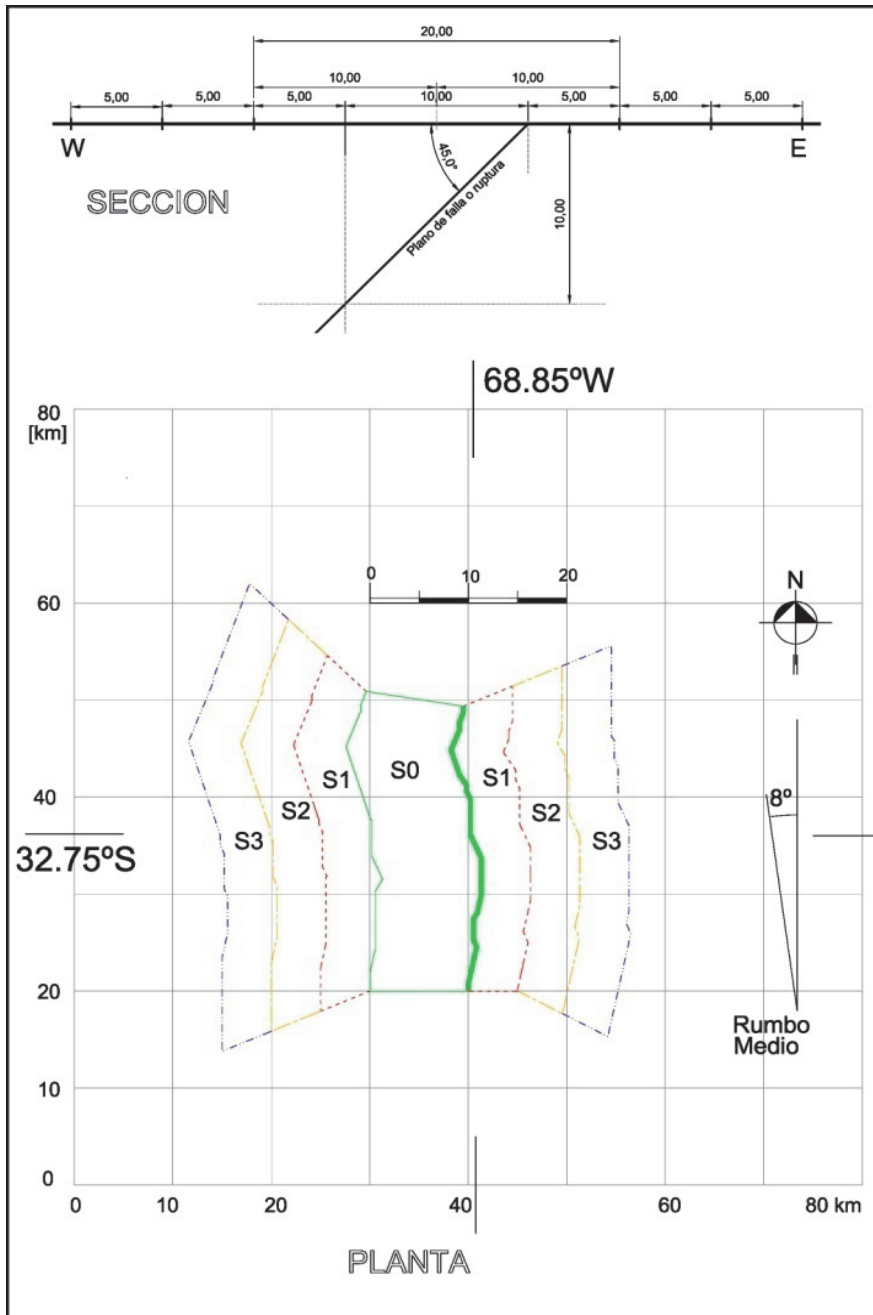


Figura 5. Traza de la falla La Cal y delimitación de distintas zonas próximas a la falla.

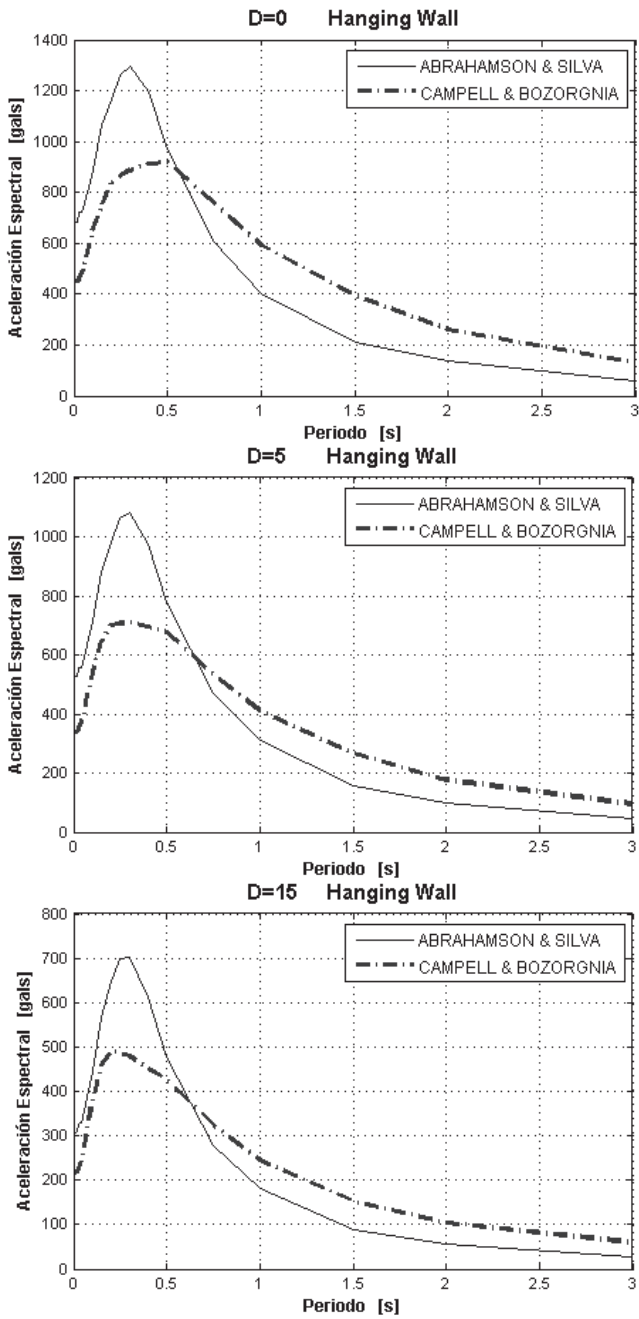


Figura 6. Espectros hallados para sitios que se encuentran en *hanging wall*.

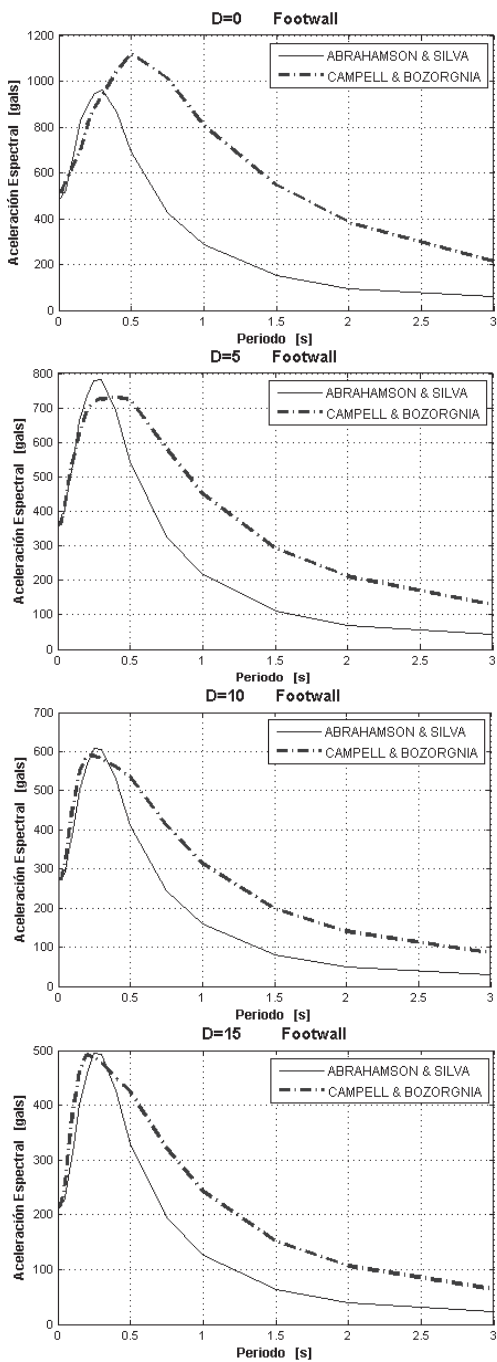


Figura 7. Espectros hallados para sitios que se encuentran en *foot wall*.



**Tabla 2**  
**Datos complementarios para hallar espectros en diferentes zonas**

	<i>Bloque levantado (hanging wall)</i>				<i>Bloque deprimido (foot wall)</i>			
	D=0	D=5	D=10	D=15	D=0	D=5	D=10	D=15
D (km)								
PGA (g) Abrahamson	0.756	0.498	0.331	0.229	0.445	0.297	0.194	0.142
PGA (g) Campbell	0.508	0.331	0.234	0.180	0.633	0.360	0.244	0.180
R <sub>RUP</sub> (km)	7.06	10.60	14.14	17.74	0.71	5.52	10.51	15.51
R <sub>JB</sub> (km)	0.00	3.61	8.61	13.61	0.50	5.50	10.50	15.50

**Resultados**

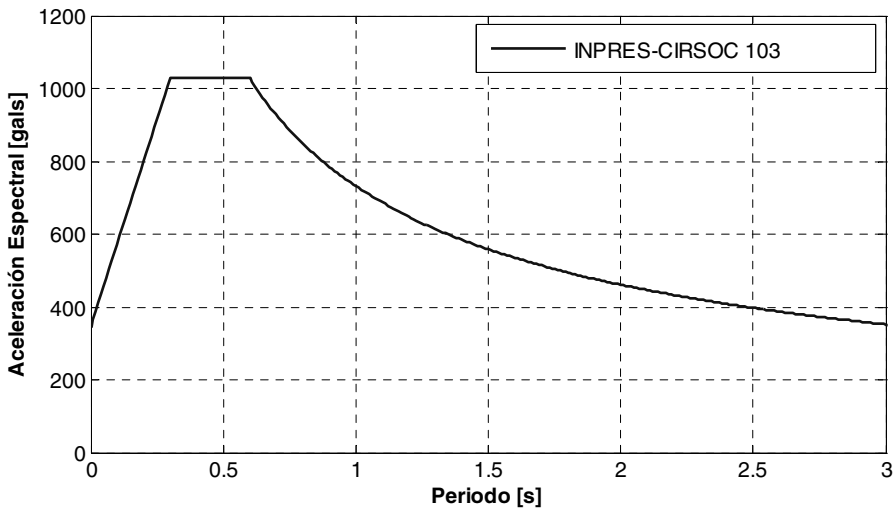
En la Figura 6 se presentan los espectros encontrados para los sitios que se encuentran en el bloque levantado (*hanging wall*). En la Figura 7 se muestran los espectros para los puntos que se hallan sobre el bloque deprimido (*foot wall*).

Se destaca que el r de PGA que se obtiene con el modelo de (A-S), en la mayor parte de los casos analizados tiene valores más altos a los que se encuentran con el modelo de (C-B), por lo tanto es de esperarse espectros diferentes. Es probable que el modelo de A-S al incorporar datos provenientes de réplicas y premonitores pueden haber llevado a obtener regresiones con valores más altos de PGA. Esto ultimo puede deberse a que las magnitudes bajas mantienen al suelo en comportamiento lineal con posibilidad de resonancia. Cabe aclarar que lo dicho precedentemente es una hipótesis a confirmar y requiere de estudios específicos que exceden el presente trabajo.

En los casos estudiados se verifica una fuerte atenuación de las ordenadas espectrales en cortas distancias; se aprecia que para toda la banda del espectro, las ordenadas se reducen prácticamente a la mitad al pasar de sitios con D=0 a sitios con D=15km.

Si fijamos la atención en los sitios con D=0 sobre el bloque levantado (*hanging wall*) que se muestran en la Figura 6, el modelo de A-S describe una curva con un pico muy pronunciado de grandes ordenadas en la banda de periodo que va de 0.2 a 0.4seg. La forma de la curva que se obtiene del modelo de C-B parece más realista con picos de aceleración menos pronunciados e insinuando la clásica “meseta” de aceleración constante. Se aprecia que el modelo de A-S arroja mayores aceleraciones (del orden del 40-50%) para la región espectral correspondiente a periodos bajos; en tanto que para periodos mayores a 0.6s la situación se invierte y el modelo se C-B presenta mayores ordenadas con incrementos que llegan en algunos casos al 100%.

Para los sitios ubicados sobre el bloque deprimido (Figura 7) los modelos de A-S y C-B mantienen sus formas respectivas pero dentro de la banda 0.2-0.4 arrojan niveles similares. Solo para sitios ubicados en D=0 sobre el bloque deprimido, el modelo de C-B se ubica por encima del de A-S alrededor de T=0.5s. Para periodos mayores a 0.6 s el modelo se C-B acentúa más la diferencia con mayores ordenadas espectrales.



**Figura 8.** Espectros de pseudo-aceleración elástica de la norma argentina INPRES-CIRSO 103 para la zona sísmica que incluye a la falla La Cal.

En la Figura 8, se muestra el espectro de diseño de la norma argentina INPRES-CIRSO 103 (1991) actualmente vigente para la zona sísmica donde se encuentra la falla La Cal. El espectro tiene una aceleración de anclaje de 0.35g y presenta una meseta a 1.05g entre los periodos 0.3 y 0.6s, la rama descendente lo hace con una ley de  $S_a$  elevado a la  $(-2/3)$ .

Si comparamos los resultados obtenidos con los espectros de diseño que propone la norma argentina (Tabla 3), vemos que el modelo de C-B arroja un espectro por debajo de espectro de norma para el caso del bloque levantado, en tanto que ajusta bien para sitios en el bloque deprimido. El modelo de A-S se aproxima a los valores de norma en la región de periodos bajos y queda significativamente por debajo en el resto del espectro.

Por otro lado salvo para el caso de C-B y sitios sobre D=0 para el resto de los casos (D=5, 10 y 15k) y para ambos modelos, los espectros encontrados están significativamente por debajo del espectro de norma.

**Tabla 3**  
**Ordenadas espectrales características para sitios con D = 0**

<i>T</i> [seg.]	<i>IC 103</i> [g]	<i>Bloque levantado</i>		<i>Bloque deprimido</i>	
		<i>Mod. C-B</i> [g]	<i>Mod. A-S</i> [g]	<i>Mod. C-B</i> [g]	<i>Mod. A-S</i> [g]
Máx. Ord.	1.05	0.92	1.30	1.10	0.95
0.5	1.05	0.90	1.00	1.10	0.70
1.0	0.75	0.60	0.40	0.80	0.30
1.5	0.55	0.40	0.20	0.55	0.15
2.0	0.45	0.25	0.17	0.40	0.10
2.5	0.40	0.20	0.10	0.30	0.08
3.0	0.35	0.17	0.08	0.22	0.04

**Conclusiones**

Se han identificado los parámetros sismológicos de la falla sismogénica La Cal ubicada en la provincia de Mendoza, Argentina que da lugar a un riesgo sísmico de gran importancia debido a que su extremo sur penetra francamente en la Ciudad de Mendoza y afecta al conglomerado urbano denominado “Gran Mendoza” con más de un millón de habitantes.

Para la falla La Cal, a partir de datos geológicos, se han obtenido espectros de respuesta elástica para una razón de amortiguamiento del 5% mediante dos modelos de atenuación recientemente desarrollados: a) el modelo de Abrahamson y Silva y b) el modelo de Campbell y Bozorgnia. Para ambos casos se eligieron sitios próximos a la traza de la falla y se contrastaron con las ordenadas espectrales que fija la norma argentina vigente para la zona donde se emplaza la falla en estudio.

Los resultados muestran que el modelo de A-S presenta ordenadas entre un 40 a 50% mayores a las de C-B para la aceleración espectral máxima que se corresponde con periodos comprendidos entre 0.2 y 0.3s. Para periodos mayores a 0.6s el modelo de C-B se ubica por encima del de A-S con incrementos que llegan al 100%.

El modelo de C-B alcanza ordenadas espectrales similares a las estipuladas por la norma solo en correspondencia con sitios sobre la traza de la falla (D=0 sobre el bloque deprimido). El modelo de A-S solo supera al espectro de norma en correspondencia con el pico máximo (T=0.2-0.3s), para todos los otros casos sus ordenadas son significativamente menores.

A la luz de los resultados obtenidos el modelo de C-B se presenta como más adecuado para utilizar en sitios muy próximos a la fuente sísmica (menores a 20km).

De acuerdo al presente estudio, el espectro de diseño de la norma argentina resulta adecuado para altas demandas sísmica ( $M=7$ ) a muy cortas distancias de la fuente. En tanto que, arroja valores conservadores para sitios a cierta distancia de las fuentes sísmicas.

## Referencias

- Abrahamson N. and W. Silva, 2008, Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion relations. *Earthquake Spectra*, EERI, 24(1), 67-97.
- Beyer, K., and J. J. Bommer, 2006, Relationships between median values and between aleatory variabilities for different definitions of the horizontal component of motion. *Bulletin of the Seismological Society America*, vol. 96.
- Boore D., J. Watson-Lamprey and N. Abrahamson, 2006, Orientation-independent measures of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society America*, vol. 96, no. 4A, 1502-1511.
- Campbell K., and Y. Bozorgnia, 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.
- Costa, C., M. N. Machete, R. L. Dart, H. E. Bastías, J. D. Paredes, L. P. Perucca, G. E. Tello and K. M. Haller, 2000, *Map and database of quaternary faults and folds in Argentina*, USGS, International, Lithosphere Program, Report 00-0108, February, 2000.
- Frau C., 2009, *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 pp., Mendoza, Argentina.
- Frau, C. D. y G. R. Saragoni, 2005, Demanda sísmica de fuente cercana. Situación del Oeste Argentino, *Cong. Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, IX Jornadas, Concepción, Chile.
- , 2010, Espectros de diseño incluyendo efectos de directividad de la ruptura para la falla La Cal en la Ciudad de Mendoza, Argentina. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. X Jornadas*. Santiago de Chile, 22 al 27 mayo 2010.
- Huang, Y., A. S. Whittaker and N. Luco, 2008, Maximum spectral demands in the near-fault region, *Earthquake Spectra*, vol. 24, no. 1, 319-341, February 2008.

- International Conference of Building Officials (ICBO), Código Uniforme de la Edificación-1997, 1º Edición en Español, 1999, Basada en la 4º Edición del Uniform Building Code, 1997, EEUU.
- Lay, T. and T. C. Wallace, 1995, *Modern Global Seismology*, San Diego, Academic Press.
- Mingorance F., 2001, "Parámetros geológicos de la deformación cosísmica asociada al terremoto de Mendoza de 1861, (M=7) Argentina", *7th Congress of the Brazilian Geophysical Society, Soil Earth Geophysics*, Actas TS27, 1316-1319, Salvador, Brasil.
- Tornello M. and C. Frau, 2010, Experiencias sobre aislamiento sísmico en Mendoza, Argentina, Diseño, Modelación y Construcción, *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 15(1), 1-47, Ecuador.
- Walling, M., W. J. Silva and N. Abrahamson, 2008, Nonlinear site amplification factors for constraining the NGA models, *Earthquake Spectra* 24, 243-255.
- Wells, D. L. and K. J. Coppersmith, 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society America*, vol. 84, no. 4, 974-1002.
- Yeats R., K. Sieh and C. Allen, 1997, *The geology of earthquakes*, Oxford University Press, 499 p., New York.