

ACTUALIZACIÓN DE LA PERCEPCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL VALLE LONGITUDINAL DE LAS SIERRAS DE CÓRDOBA (ARGENTINA)¹

Ricardo J. Rocca²

Resumen: El Valle Longitudinal de las Sierras de Córdoba es un importante rasgo geomorfológico que se localiza en el centro de Argentina. En el mismo se encuentran importantes obras de infraestructura como presas y una central nuclear. Aquellas levantadas en los últimos 30 años cuentan con estudios de riesgo sísmico que reflejan el conocimiento que existía en el momento de su construcción. Las condiciones sismotectónicas no han cambiado, pero sí existen nuevas interpretaciones y mejor conocimiento del problema sísmico. Se conoce mejor la historia tectónica del centro del país y se han podido determinar nuevas fuentes neotectónicas. Existen mejores mediciones de las solicitudes sísmicas a nivel mundial, nuevas leyes de atenuación y se han realizado mediciones instrumentales en algunos de los sitios donde están implantadas obras de importancia. El trabajo analiza el riesgo sísmico de algunas obras significativas y compara retrospectivamente algunos de los criterios que se emplearon al momento de su formulación. Actualiza una contribución realizada en conjunto con Decanini y Prato a fines de la década de 1980. Los valores de las aceleraciones máximas obtenidas se han incrementado en forma general, debido a los cambios en las leyes de atenuación.

Palabras claves: Córdoba, riesgo sísmico, sismicidad, valle longitudinal.

UPDATING OF THE SEISMIC RISK PERCEPTION IN THE LONGITUDINAL VALLEY OF THE CÓRDOBA RANGES (ARGENTINA)

Abstract: The Longitudinal Valley of the Córdoba Ranges is an important geomorphologic feature located in the center of Argentina. There are built in the area important facilities like dams and a nuclear power plant. Those constructed in the last 30 years have studies of seismic risk that reflect the knowledge that existed at the time of its construction. The seismic tectonic conditions have not changed, but there are new interpretations and better understanding of the seismic problem. The tectonic history of the centre of the country is better known and new neotectonic sources have been identified. There are new and better measurements of seismic solicitations, new attenuation laws and strong motions have been recorded in some of the places where important facilities are located. The paper analyzes the seismic risk of some significant facilities and compares in retrospect some of the criteria that were used at the time of its formulation. It updates a contribution made in collaboration with L. Decanini and C. Prato in the late 1980's. The values of maximum accelerations obtained have risen, mainly due to changes in attenuation laws.

Keywords: Córdoba, longitudinal valley, seismicity, seismic risk.

INTRODUCCIÓN

Las Sierras de Córdoba son la formación montañosa más oriental de las Sierras Pampeanas, ubicadas en el centro de Argentina. El Valle Longitudinal de las Sierras de Córdoba es un importante rasgo geomorfológico de origen tectónico de unos 200 Km de longitud. Tiene tres denominaciones de norte a sur donde se lo conoce como valle de Punilla, Los Reartes y Calamuchita (Figura 1).

¹ Artículo recibido el 25 de noviembre de 2007 y aceptado el 25 de febrero de 2008.

² Departamento de Construcciones Civiles, F.C.E.F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Velez Sarsfield 1611, (X5016GCA) Córdoba, Argentina. E-mail: rjrocca@efn.uncor.edu

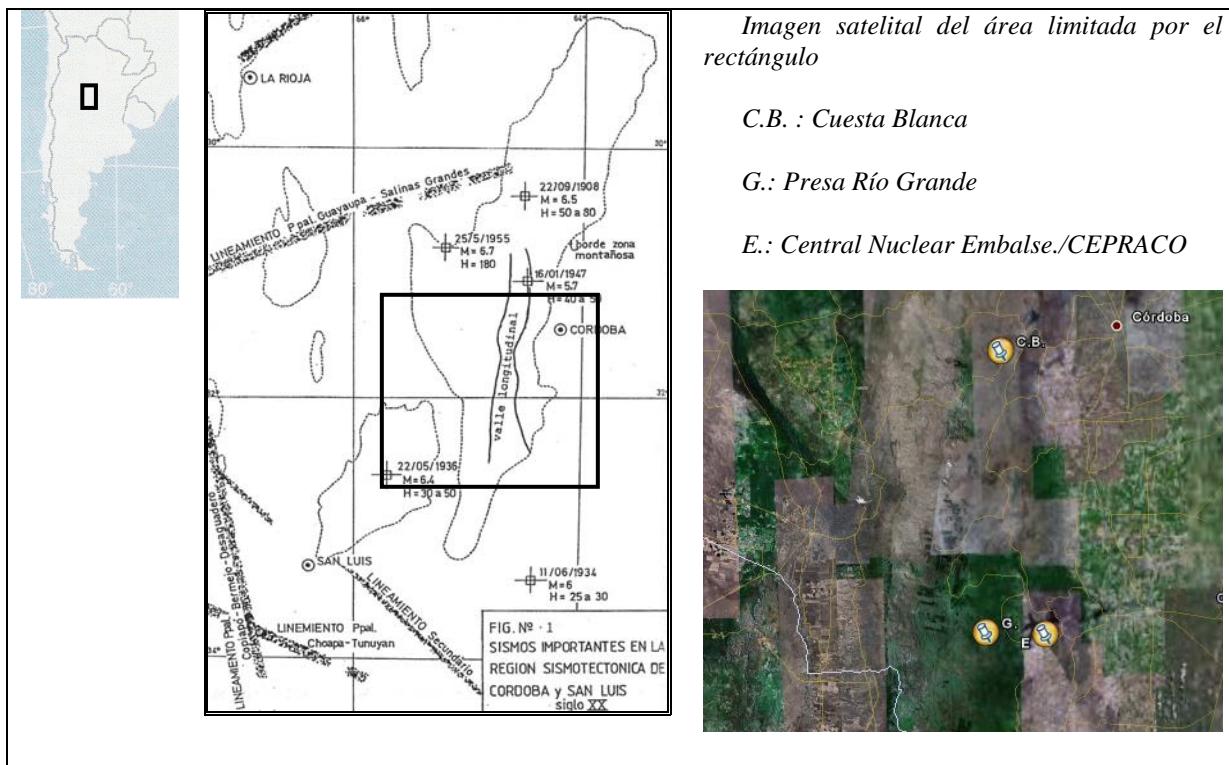


Figura 1: Ubicación del valle Longitudinal, dentro del entorno sismo-tectónico. En el mapa principal se han delineado los bordes de zonas montañosas, las megatrazas tectónicas y la ubicación de eventos sísmicos relevantes. El valle longitudinal se encuentra dentro de las Sierras de Córdoba, al oeste de la ciudad de Córdoba. En la imagen satelital se han posicionado los sitios citados en el texto (según Rocca et al., 1991).

En el mismo se encuentran importantes obras de infraestructura. Aquellas construidas en los últimos 30 años cuentan con estudios de riesgo sísmico que reflejan el conocimiento que existía en el momento de su construcción. En ese grupo se encuentra el Complejo Hidroeléctrico Río Grande y la Central Nuclear Embalse. Asimismo, para otros proyectos no ejecutados como la Presa Cuesta Blanca y la Planta de Cobalto (CEPRACO), adyacente a la Central Nuclear Embalse, se realizaron estudios de riesgo sísmico.

En base a los resultados obtenidos se escribieron algunos artículos que se publicaron a principios de la década de 1990. Uno de ellos realizado por el autor, conjuntamente con L. Decanini y C. Prato (de aquí en adelante referido como RDP), es el motivo de esta actualización.

Es de destacar que si bien las condiciones sismo-tectónicas no han cambiado, existen nuevas interpretaciones y mejor conocimiento del problema sísmico. Se conoce mejor la historia tectónica del centro del país y se han podido determinar nuevas fuentes neotectónicas. Existen mejores mediciones de las solicitudes sísmicas a nivel mundial, nuevas leyes de atenuación y se han realizado mediciones instrumentales en algunos de los sitios donde están implantadas obras de importancia.

Los valores de las aceleraciones máximas se han incrementado en forma general, debido a los cambios en las leyes de atenuación. En forma específica, en algunos sitios próximos a las fuentes sismo-genéticas, hay una mayor participación de efectos propios de éstas.

VISIÓN RETROSPECTIVA

Para poder interpretar la esencia del trabajo RDP, es necesario resumir sucintamente los antecedentes con los que se contaba al momento de su redacción.

Ambiente tectónico

El esquema tectónico regional era primitivo, aunque existían grupos de investigadores con ideas próximas a las actuales. El conocimiento de la actividad de las fallas, dentro de las Sierras Pampeanas, era muy incipiente y se consideraba que la actividad sísmica era moderada o residual. Una síntesis de ello fue planteada por Amos et al. (1981). Para toda la provincia de Córdoba se describieron tres fallas: la Sierra Baja de San Marcos en el norte (AR 52 de Figura 7), la Falla de Potrero de Garay en el valle de los Reartes (AR 53c de Figura 7) y una falla que causó el sismo de 1934, en Sampacho, localizada al sur del valle (Figura 1). También se encontraban descriptos en la literatura un sobrecorrimiento en la parte central del valle aflorante en una labor minera en Cosquín (AR 53 a de Figura 7) y se acababa de abrir un corte en la parte sur del mismo en Santa Rosa (AR 53 d de Figura 7), donde se observa un cabalgamiento de basamento sobre sedimentos modernos.

Estudios de riesgo sísmico

En la década de 1970 los procedimientos para determinar el riesgo sísmico para presas y para centrales nucleares tenían escaso desarrollo. Actualmente, distintas agencias internacionales como la ICOLD (1989), USCOLD (1999), FEMA (2005) y la IAEA (2002) han generado un cuerpo de procedimientos que se ha estandarizado.

La determinación del sismo de verificación del Complejo Hidroeléctrico Río Grande se realizó tomando un epicentro próximo de un sismo pequeño con $M = 4$ ocurrido el 18 de enero de 1961. Allí se implantó el sismo de Caucete de 1977, de $M = 7.4$ cuyo epicentro está a 240 km al oeste (Figura 2). Tomando la distancia al sitio y usando una ley de atenuación, se obtuvo una aceleración máxima de 0.22 g. Es de destacar que ese sismo de 1961 fue recalculado y relocalizado posteriormente por la Universidad de La Plata en 1982, quedando a unos 165 km de la anterior posición y de la presa. Esto fue publicado cuando el proyecto estaba ya finalizado y la construcción de la presa estaba muy avanzada. En otras palabras, la solución dada en ese momento perdió la principal relación causal. No obstante ello, el valor adoptado no parece actualmente desacertado.

En el caso de la Central Nuclear Embalse, se realizaron varios estudios con resultados diferentes, lo que fue motivo de importantes discusiones. La Tabla 1 resume algunos de ellos, para el sismo de operación (OBE, por sus siglas en inglés) y el máximo sismo creíble (MCE, por sus siglas en inglés). Los primeros fueron ejecutados previos a las normativas de IAEA. Se observa que los resultados tuvieron variaciones significativas en menos de una década, lo que refleja diferencias de criterios de sus autores.

Tabla 1: Aceleraciones de verificación de la Central Nuclear Embalse. Los años corresponden a la fecha del estudio.

SISMO	(1974)	(1980)	(1983)
MCE	0.50 g	0.35 g	0.26 g
OBE	0.20 g	0.18 g	0.14 g

Para los estudios de Cuesta Blanca y de CEPRACO, ya existían normativas y por ello se determinaron Terremotos Máximos Creíbles de una manera determinística y Terremotos de Operación Normal, en forma probabilística.

Planteo de la publicación de 1991

Dentro del contexto mencionado, se planteó la publicación RDP en 1991 contenido los antecedentes sismotectónicos, históricos e instrumentales, las leyes de atenuación locales que se habían deducido (Decanini y Rocca, 1989) y los valores resultantes de los sismos de operación normal y el sismo máximo creíble, ambos definidos para presas.

ENCUADRE SISMOTECTÓNICO DEL CENTRO DE ARGENTINA

Esquema general

Dentro del contexto mencionado, se planteó la publicación RDP en 1991 contenido los antecedentes sismotectónicos, históricos e instrumentales, las leyes de atenuación locales que se habían deducido (Decanini y Rocca, 1989) y los valores resultantes de los sismos de operación normal y el sismo máximo creíble, ambos definidos para presas.

La tectónica regional del centro de Argentina, tal como se la interpreta actualmente, involucra distintos Terrenos (Terranes) que se han adosados, en distintos tiempos geológicos, desde el oeste al cráton original (Río de La Plata). En la Figura 2 se han graficado los límites de los Terrenos junto con los principales eventos sísmicos registrados en el centro de Argentina (Alvarado et al., 2005a).

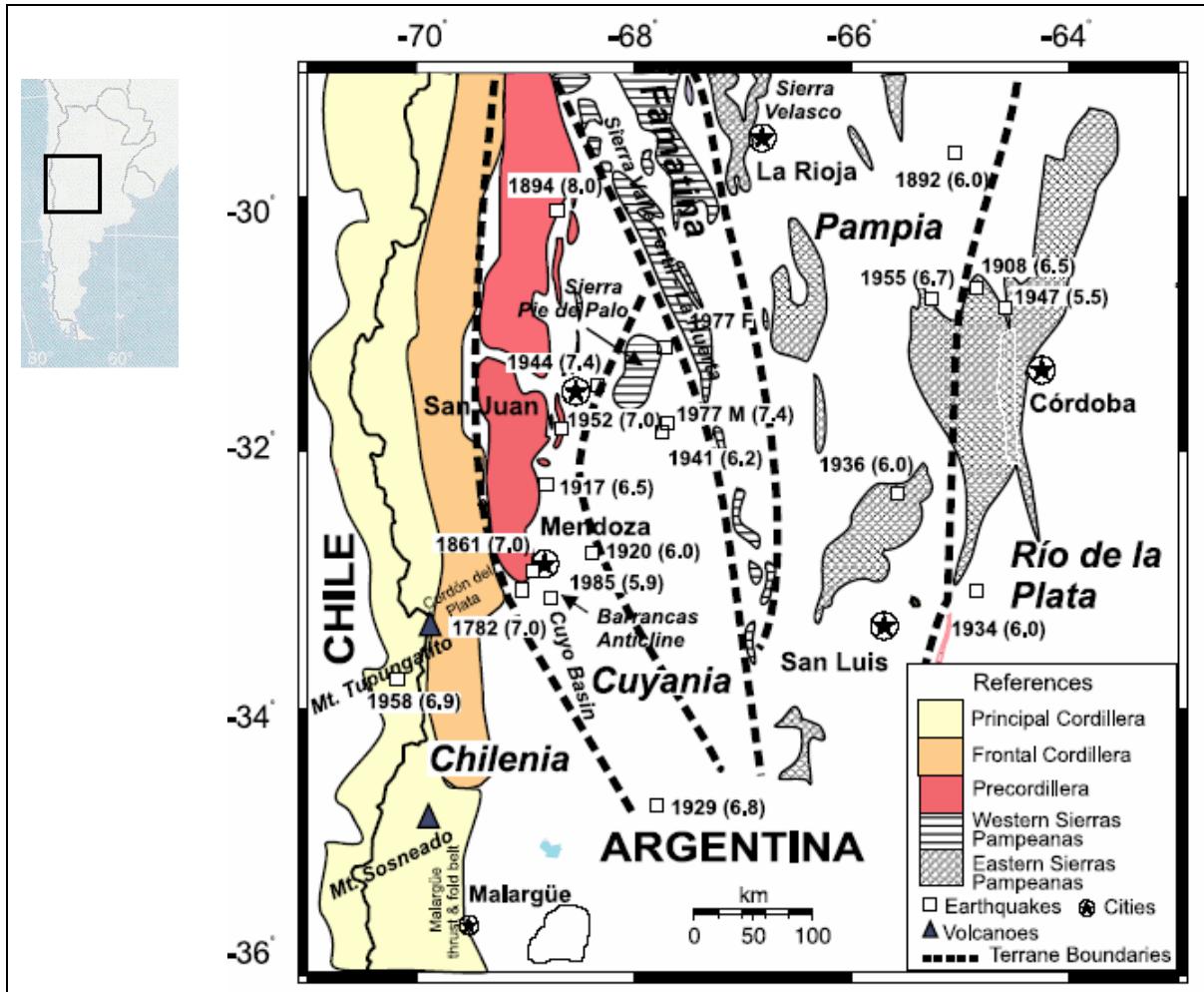


Figura 2: Distribución de los eventos sísmicos principales en los distintos Terrenos del centro de Argentina. El Valle Longitudinal esta marcado en líneas blancas unos 30 km al oeste de la ciudad de Córdoba (según Alvarado et al., 2005a).

Toda la región ubicada entre 29 y 36° S está influenciada por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa de Sudamérica, a una velocidad de aproximada de 6.3-8.4 mm por año y con un azimut de 79.5° (Figuras 3 y 4).

Merece destacar que entre 29 y 33° S, la placa de Nazca desciende hasta 100 km y luego se sub-horizontaliza a 5° aproximadamente por centenares de km, hasta alcanzar 125 km de profundidad, para terminar hundiéndose en el manto. Este comportamiento se correlaciona espacialmente con el alzamiento de las Sierras Pampeanas. Este conocimiento era muy incipiente en la década de 1980. Recién en la última década se han realizado determinaciones mediante sísmica de reflexión profunda que permite determinar fehacientemente la posición de la placa de Nazca y sus características geométricas.

En un experimento realizado recientemente, se dispusieron instrumentos de medición en estaciones, durante 18 meses (Proyecto CHARGE) en los sitios marcados con rombos en la Figura 3. En la región occidental se determinaron 14 sismos de fallas inversas, con hipocentros entre 14 y 25 km mientras que en la región oriental se determinaron 4 eventos con mecanismos inversos ($h = 16-18$ km) y de rumbo (< 10 km) (Wagner et al., 2006).

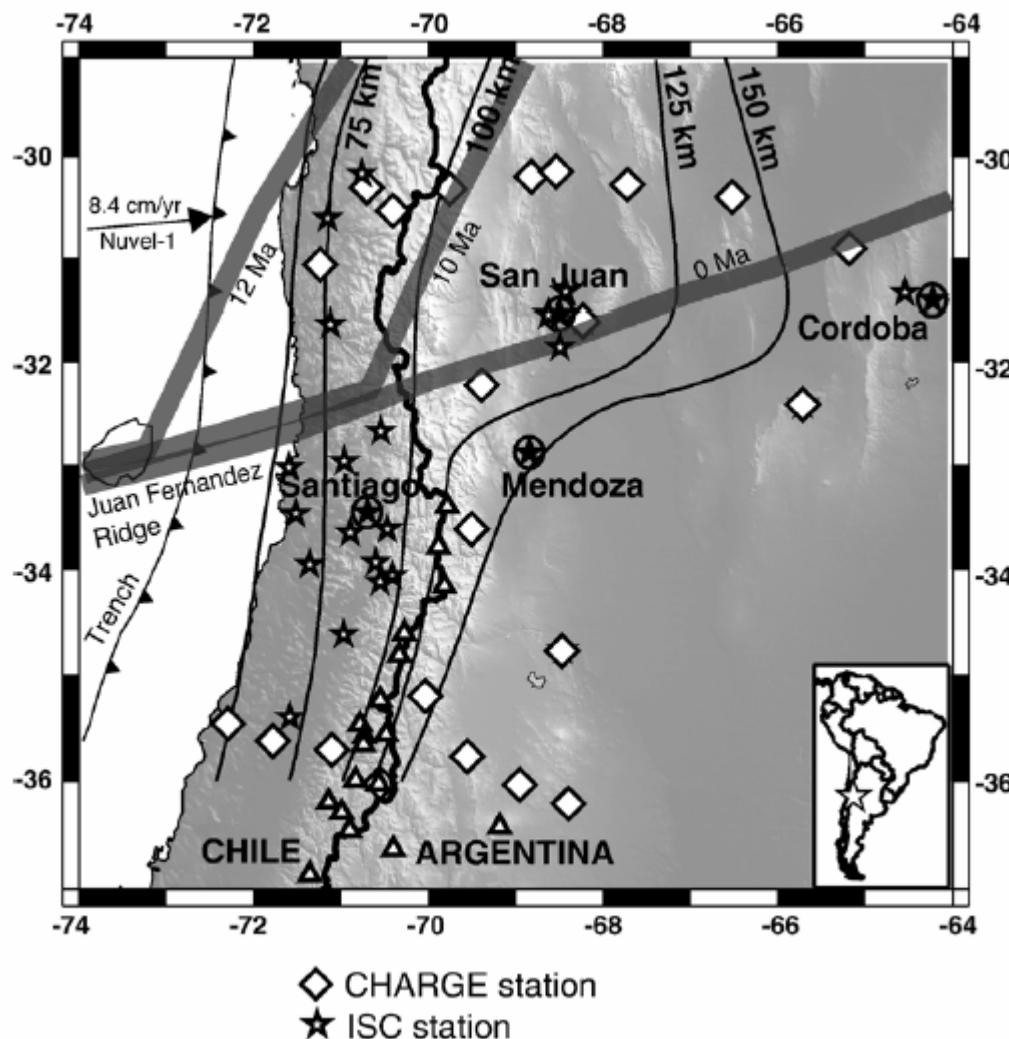


Figura 3: Variaciones temporales de la posición de la dorsal Juan Fernández en la subducción de la Placa de Nazca (delineadas con profundidades). Están marcadas las estaciones sísmicas temporarias (según Wagner et al., 2006).

La geometría subhorizontal de este sector de la placa de Nazca está originada en la subducción de la dorsal asísmica de Juan Fernández que tiene el azimut señalado en el párrafo anterior. El desarrollo comenzó hace 18-20 millones de años, y se incrementó entre 2-10 millones de años. La configuración actual ha sido estable desde hace unos 2 a 5 millones de años.

Sismotectónica cortical resultante

La Sierras Pampeanas (SP) están compuestas por rocas cristalinas precámbricas y paleozoicas que fueron levantadas como bloques rígidos y volcadas por compresión, durante la formación de los Andes y la subducción de la dorsal Juan Fernández. La estructura presente de las SP está controlada por fallas inversas que tienden a horizontalizarse en una transición frágil-dúctil en profundidad (Figura 6b).

El proceso que elevó los bloques del basamento ocurrió principalmente en el Mioceno temprano. Los primeros registros de alzamiento corresponden a Sierras Pampeanas Orientales (ESP) durante Eoceno, mostrando reactivación de fallas normales del cretácico. Las antiguas zonas de debilidad son tomadas por el fallamiento andino, el cual muchas veces muestra inversiones de estructuras previas. El estilo estructural está altamente controlado por la fábrica del basamento cristalino, y la vergencia es principalmente hacia el oeste, en fallas paralelas a la foliación.

La sutura entre los Terrenos Pampia y Cuyania (Figura 2) se encuentra al oeste de la Sierra Valle Fértil-La Huerta (Falla del Río Desaguadero), y muestra una zona de corte dúctil milonitizada, que presenta una estructura de reflexión sísmica importante. Constituye el límite entre las Sierras Pampeanas Occidentales (WSP) y las Sierras Pampeanas Orientales (ESP) (Alvarado et al., 2005b). Esta observación fue realizada previamente por Castano et al. (1981), basada exclusivamente en la observación de la sismicidad en profundidad.

Las Sierras Pampeanas constituyen una región sísmicamente activa en la zona andina de trasarco, aunque existe una marcada diferencia entre las dos regiones diferenciadas (Figura 4).

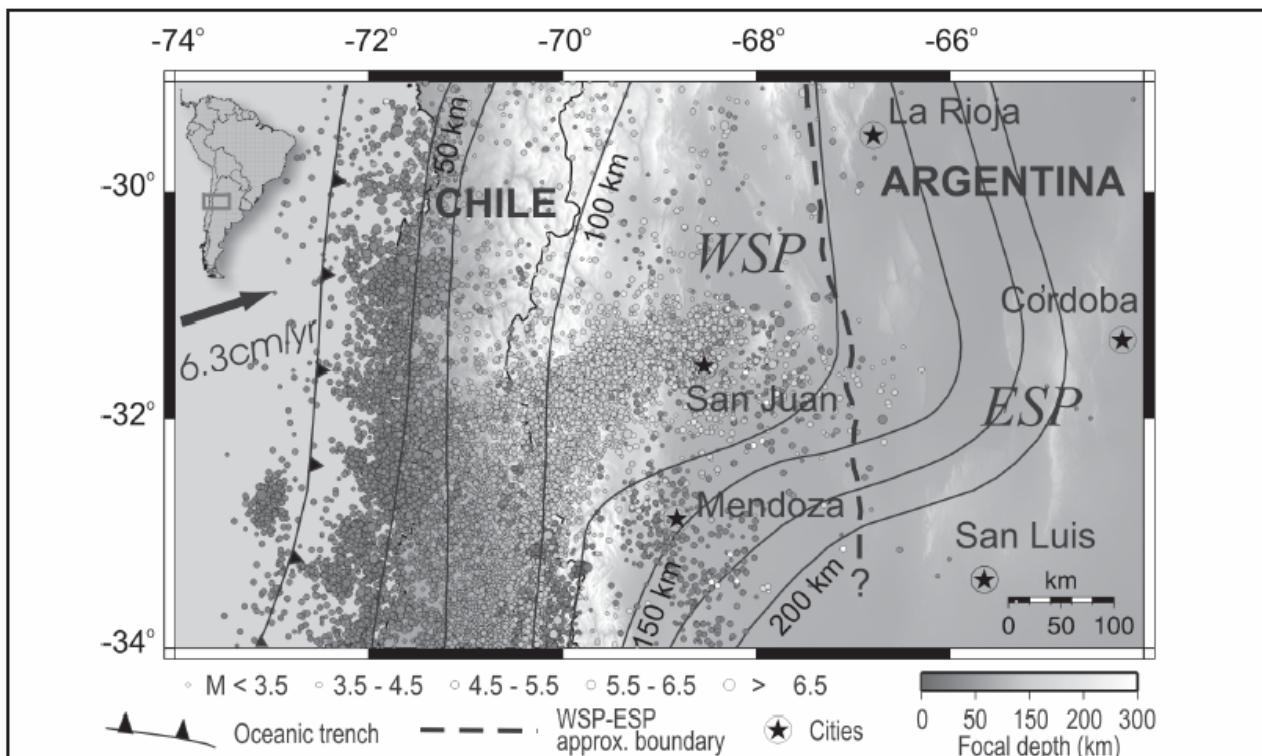


Figura 4: Distribución de epicentros registrados en los últimos 10 años, en las Sierras Pampeanas Occidentales WSP y Orientales ESP. Se observa marcada diferencia de actividad sísmica entre ambas (según Alvarado et al., 2005b).

Las Sierras Pampeanas Occidentales son muchísimo más activas, con mecanismos focales inversos intraplaca que alcanzan hasta 25 km. Las Sierras Pampeanas Orientales presentan escasa actividad, con mecanismos focales inversos y de desplazamiento de rumbo con profundidades focales menores de 10 km (Alvarado et al., 2005).

Mediciones geodésicas

Los vectores de velocidades medidos recientemente muestran claramente un importante decaimiento entre las Sierras Pampeanas Occidentales (WSP) y las Orientales (ESP) (Brooks et al., 2003). La falla de Valle Fértil, sutura entre el terreno de Cuyania y los terrenos orientales (Figura 2), juega un importante control estructural en la compresión de la región trasarco (Figura 5).

En observaciones sísmicas efectuadas durante un período de 1.5 años, se aprecian pequeños terremotos señalados en el corte en la Figura 6b. Su posición es coincidente con la de los GPS. La deformación cortical observada lejos de la trinchera oceánica (donde se subducta la placa de Nazca) contribuye a recuperar la componente elástica de la subducción (línea verde de Figura 6). Los estudios indican que la interacción en la convergencia Nazca-Sud América a una distancia de 600 km medidos desde la trinchera oceánica, genera una componente elástica (Alvarado et al., 2005a).

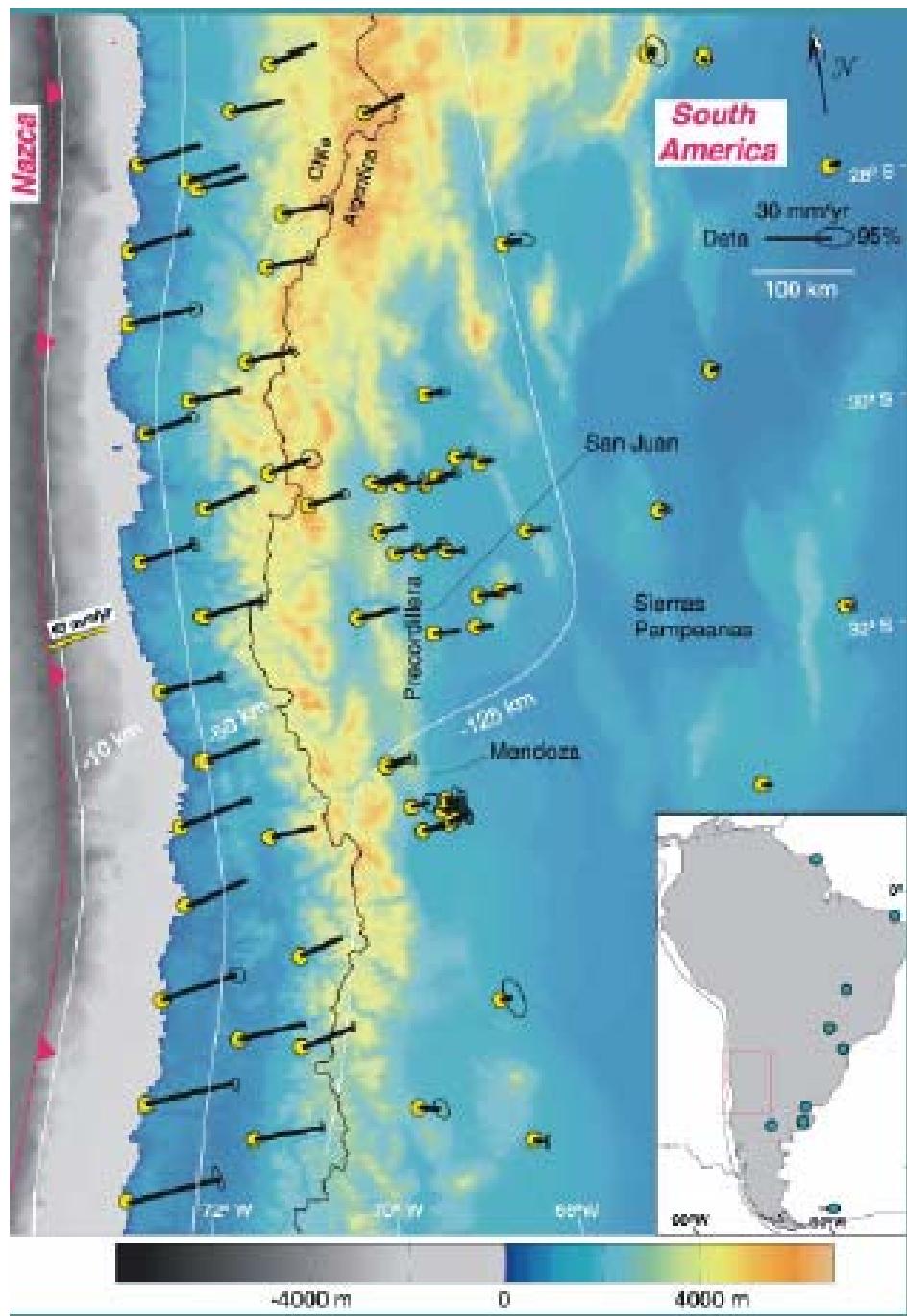


Figura 5: Vectores de velocidad medidas con GPS (según Brooks et al., 2003).

Estos resultados han llevado a postular la existencia de una trabazón importante entre la placa de Nazca y la Sudamericana (Brooks et al., 2003). Consecuentemente el frente de deformación se traslada hacia el este hasta la zona de la falla del Valle Fértil (Río Desaguadero), señalado con una flecha vertical en la Figura 6a.

Fallamiento activo local

El ambiente tectónico donde se encuentra emplazado el Valle Longitudinal es el de las Sierras Pampeanas Orientales ESP. Localmente se la conoce como Sierras de Córdoba. En el corte de la Figura 6 son las que se encuentran en el extremo Este (Sierra Chica de Córdoba, Sierra Grande y Sierra de Pocho). El sector al este de la Falla de Valle Fértil (Río Desaguadero) se le conoce como Región Sismotectónica de Córdoba y San Luis (Figura 1) (Castano et al., 1981; Decanini et al., 1989).

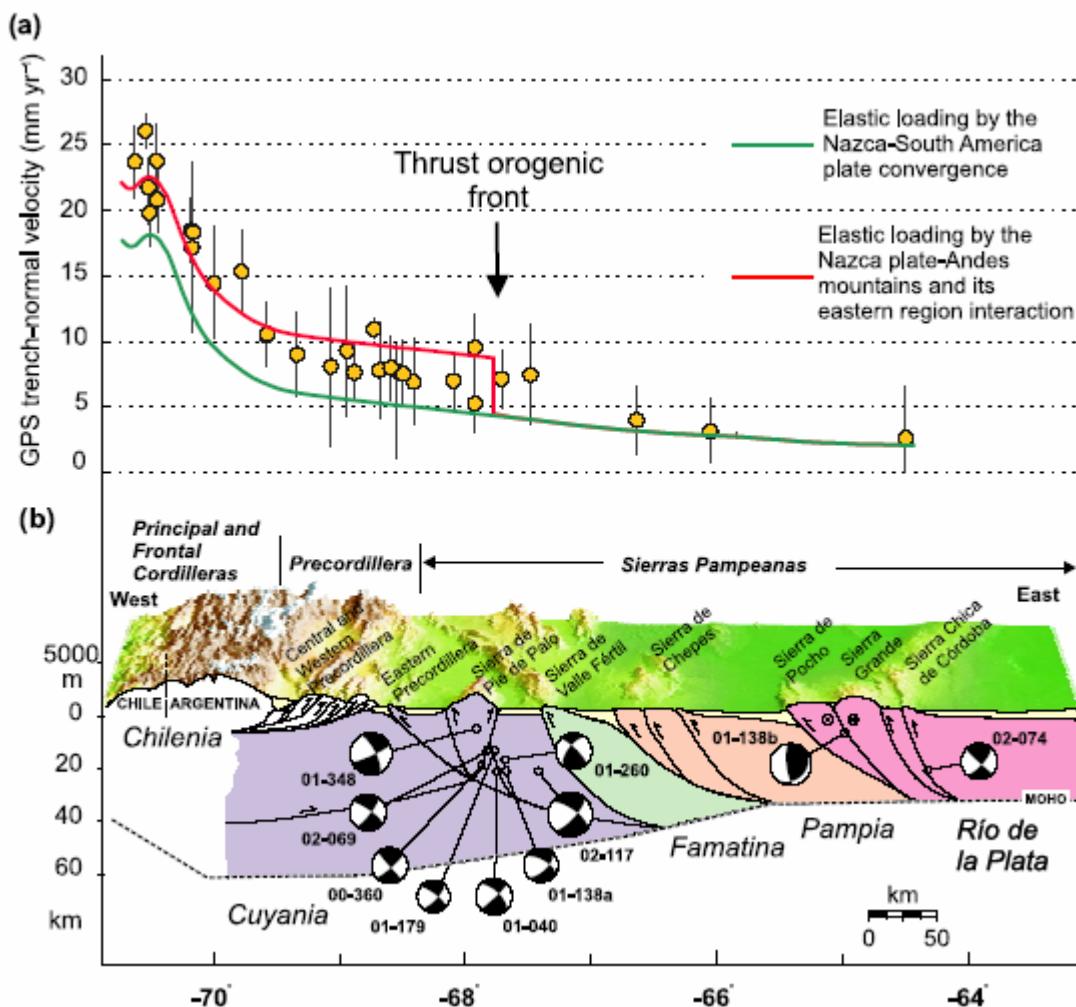


Figura 6: Variación de la velocidad de deformación y su relación con la Falla de Valle Fértil y los eventos registrados con el experimento CHARGE. El Valle Longitudinal se encuentra al oeste de la falla que eleva la Sierra Chica de Córdoba, que es la primera desde la derecha (Alvarado et al., 2005a).

Si bien es cierto que las rocas que constituyen las Sierras Pampeanas son mayormente pre- a Paleozoicas, los movimientos tectónicos andinos han modelado el relieve mediante movimientos de bloques. Este alzamiento se ha producido por medio de sismos, cuya frecuencia ha sido variable, tal como se expresó previamente en 3.1. La actividad actual, algo reducida, se manifiesta a través de rasgos neotectónicos. El principal rasgo de la zona de estudio es la Falla de la Sierra Chica (FSC) que constituye el límite este del Valle Longitudinal (Figura 6). Tiene varios tramos con denominaciones locales: Cosquín (AR 53a), Carlos Paz (AR 53b), Potrero de Garay (AR 53c) y Santa Rosa (AR 53d) (Costa et al., 2000, Figura 7).

Se han realizado algunas dataciones geocronológicas en la Sierra Baja de San Marcos (AR 52) y en la Falla de Comechigones (AR 50). Ambas corroboran actividad tectónica en los últimos 5,000 años.

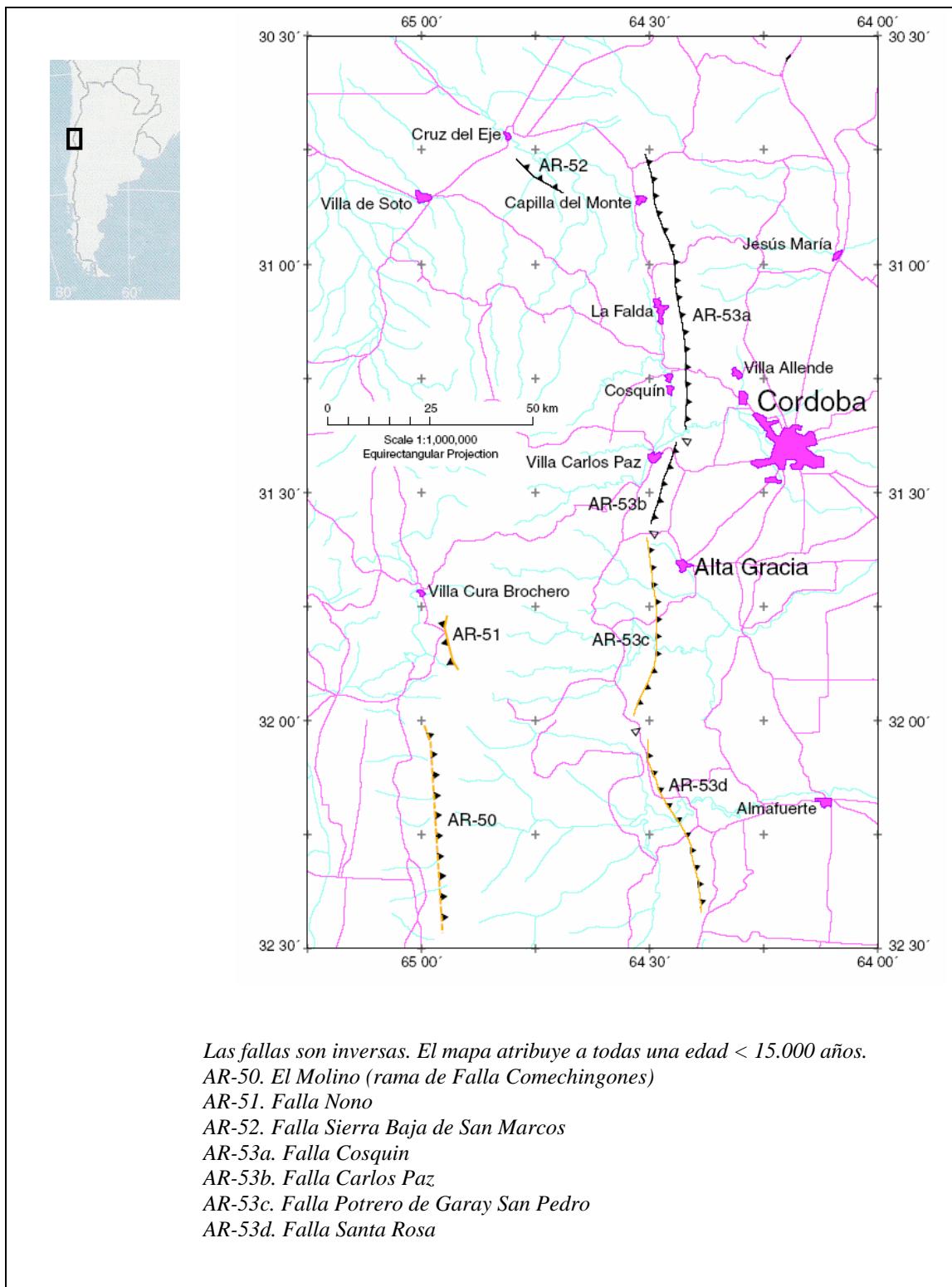


Figura 7: Principales fallas presentes en las Sierras Pampeanas. Se destacan las relacionadas con la falla de la Sierra Chica AR 53, que constituyen el límite este del Valle Longitudinal (según Costa et al., 2000).

ASPECTOS SISMOLÓGICOS

Sismicidad histórica

La sismicidad de la región se completa con los antecedentes históricos no registrados instrumentalmente, pero que han sido cronicados desde la época colonial. Si bien se ha realizado una revisión desde el siglo XVII, solamente se ha encontrado información en el siglo XIX. Es de destacar que estos antecedentes no han cambiado en los últimos 30 años, debido a que no se ha encontrado nueva información.

- Según el Profesor E. Bischoff (Historia de la Provincia de Córdoba, Tomo I, p. 210) el 1 de febrero de 1826 se produjo un fuerte movimiento que afectó a la población de Río Cuarto (200 km al sur de Córdoba), produciendo daños en la Iglesia Principal, construida en 1820. Hoy se conoce que el sismo que lo generó es lejano con epicentro 400 km al norte de la ciudad de Córdoba.
- Charles Darwin señaló la existencia de indicios sobre un terremoto en Córdoba que modificó la morfología de un lago, sin poder precisar la fecha, pero ocurrido antes de su viaje (1831-1836) (The Red Notebook of Charles Darwin, Ed. con Introducción y Notas de S. Herbert. British Museum (Natural History), Cornell University Press, 1980)
- En 1849 se produjo un sismo en la Provincia de San Luis (Figura 2), indicado como fuerte terremoto (citado en la Gran Enciclopedia Argentina. Ed. Ediar 1963)
- En la ciudad de Córdoba se produjo alarma por un temblor el 27 de marzo de 1877 (Ob. cit.)
- El 12 de febrero de 1880 se produjo un sismo que afectó a la ciudad de San Luis y que habría producido cambios topográficos en la zona. (Ob. cit.)

Otros antecedentes no instrumentales, ya en el Siglo XX son los siguientes:

- El 24 de noviembre de 1906. Segundo informe periodístico de la época, en las poblaciones de San Ignacio y la Cruz se percibió un movimiento sísmico con una duración de 5 segundos y probablemente con dirección S W. Es probable que el epicentro se haya ubicado en esa área. Su magnitud puede estimarse entre 3 y 4 y la intensidad en la escala Mercalli Modificada en IV.
- El 1ro de julio de 1908. Segundo informe periodístico de entonces (Diario La Nación) en la Cruz se sintió un fuerte temblor con una duración de 15 segundos y probablemente con dirección SW. Por lo indicado es posible que su Magnitud haya estado comprendida entre 3 y 4. Se estima una Intensidad MM de IV.
- El 22 de septiembre de 1908. Sismo de Deán Funes. Se produjo fuerte movimiento en la población del mismo nombre, alcanzando una Intensidad MM VII.
- En 1910 se produjo un movimiento sísmico que fue sentido en Sampacho, referido por informaciones periodísticas del año 1934 luego del terremoto de Sampacho.
- Década 1910-1920. Segundo relatos de pobladores en la zona de Deán Funes se produjeron varios movimientos sísmicos, probablemente de escasa magnitud. También se mencionan referencias sobre movimientos percibidos en las localidades de Avellaneda y Macha en el norte de la Provincia de Córdoba.

Sismos importantes ocurridos en la región de Córdoba y San Luis

De la recopilación de sismos instrumentales, se han seleccionado los sismos más importantes ocurridos en el siglo XX en la región oriental de las Sierras Pampeanas cuyas características están dadas en la Figuras 1 y 2. Todos los sismos son de mediana magnitud, con epicentros localizados a mediana profundidad.

Sismos medidos instrumentalmente. El caso del sismo de 2003.

El 5 de marzo de 2003 se produjo un pequeño sismo ($mb = 4.1$ (USGS), $mb = 4.3$ (ISCCD), $M = 5$ (INPRES)), que fue captado por los instrumentos de la Central Nuclear Embalse (CNE), tanto en campo libre en un afloramiento rocoso, como en el Edificio de la Central.

El USGS lo localizó a 6 km al noroeste de la CNE, desconociendo la profundidad ($h = 33$ km). El INPRES lo colocó provisoriamente 15 km al norte de la CNE, sin precisar la profundidad ($h = 33$ km), mientras que ISCCD lo ubicó a unos 12 km de la CNE y habiendo calculado su foco a 47 km de profundidad.

Este evento sirve para evaluar distintas leyes de atenuación con la distancia. El único juego de datos completo corresponde al ISCCD. Para considerar los otros cálculos se adoptó una profundidad de 47 km. La Tabla 2 señala los valores obtenidos.

Tabla 2: Estimación de la aceleración del sismo de 2003 en CNE. R = distancia hipocentral.

Localización del Sismo	Toro et al. (1997)	Campbell et al. (2006)	Idriss (2007)
ISCCD $M = 4.3$, $R = 48.5$ Km	0.0147 g	0.0073 g	0.0105 g
USGS $M = 4.1$, $R = 47.3$ Km	0.0128 g	0.0060 g	0.0157 g
INPRES $M = 5.0$, $R = 50.5$ Km	0.0266 g	0.0157 g	0.0194 g

Las relaciones de Campbell et al. (2006) e Idriss (2007) han sido desarrolladas mediante regresiones, con datos del oeste de Estados Unidos. La relación de Toro et al. (1997) se ha generado con datos del centro de Estados Unidos.

Los valores de aceleración máxima registrados fueron: $a = 0.0125$ g para la componente longitudinal y $a = 0.0145$ g para la componente transversal. Ambos valores son muy pequeños y son difíciles de evaluar con las leyes de atenuación.

En función de estos registros se puede concluir que la ley de atenuación de Toro es la que mejor reflejaría el estado actual del conocimiento en lo relativo a sitios en el Valle y a las leyes de atenuación en general. Esto es particularmente válido para la consideración del juego de datos más completo, el del ISCCD.

RIESGO SÍSMICO

La determinación actual del Riesgo Sísmico implica la formulación de al menos dos tipos de sismos. El Terremoto Máximo Creíble (MCE) requiere identificar las fuentes sísmicas que pueden tener influencia sobre el sitio. A ellas se les asigna la magnitud del evento de acuerdo con los antecedentes, y en base a la distancia al sitio, se calcula las solicitudes en roca.

De acuerdo a los antecedentes, existen fuentes locales con mediana capacidad situados dentro de la provincia Sismotectónica y fuentes lejanas en el oeste de Argentina con mayor capacidad de generación de sismos destructivos.

Terremotos lejanos

Los terremotos lejanos importantes, registrados en la región al oeste de la provincia Sismotectónica están graficados en la Figura 2.

La falla sismogenética más cercana es la de Valle Fértil (Río Desaguadero), que está situada a unos 240 km del Valle Longitudinal y es capaz de generar un sismo de magnitud 7.8. Es de destacar nuevamente que esta falla ha sido señalada como un umbral sísmico, debido a que hacia el este de ella la actividad sísmica instrumental decrece notoriamente (Castano et al., 1981; Alvarado et al., 2005).

En la región occidental de Argentina existe un pormenorizado estudio de las fallas activas, que incluye la determinación de sus períodos de recurrencia probables. Del examen de sus ubicaciones, se infiere que las influencias de estas fallas es menor que la de Valle Fértil, por ser la más próxima al Valle Longitudinal.

Terremotos locales

Las Figuras 1 y 2 contienen los principales eventos instrumentales registrados en las Sierras Pampeanas. Es de destacar que cuando se registraron estos eventos, la disponibilidad de registros no era lo suficientemente grande como para tener absoluta certeza de sus posiciones epicentrales. Por lo tanto, puede haber variaciones significativas en la ubicación de los hipocentros.

En casos de incertidumbre, existe una tendencia natural a atribuir un evento sísmico a la falla cercana más importante. Si bien esto puede ser impreciso e incluso erróneo para un evento pequeño, el criterio suele ser cierto para los eventos extremos, ya que hay una relación directa entre el tamaño de la falla y la magnitud del sismo que puede generar.

Cuando se trata de asignar determinísticamente un evento sísmico a una falla activa, hay que tener en cuenta distintos factores, los que tienen cierto grado de arbitrariedad. A ello se le suma las incertidumbres propias de la determinación de la actividad de la falla.

En el caso de la FSC si bien se extiende unos 180 km, está claro que es una superficie compuesta de varios tramos, de 40 a 50 km cada uno, con características diferentes, debido a las inclinaciones (buzamientos) y sus rumbos de los distintos tramos que presentan diferentes convexidades en un mapa (AR 53 de Figura 7). Esto hace que la longitud de ruptura en un evento sísmico tenga barreras geométricas dentro de la longitud total de la FSC. Asimismo, se pueden hacer hipótesis de la longitud de ruptura dentro de cada tramo relativamente homogéneo.

En la parte sur del Valle, aunque fuera del mismo, se destaca influencia de la Falla El Molino que es una rama de la falla Comechingones (AR 50 de Figura 7). Su actividad tectónica ha sido datada con una edad de fallamiento de 800 a 1200 años (Costa, 2004). Se le puede atribuir una longitud de ruptura del orden de 25 km de longitud.

Cuando se analizan las magnitudes relacionándolas con el tamaño de las fallas, se usan regresiones empíricas (Wells et al., 1994) (Tabla 3). En el caso de la FSC, la magnitud es $M = 6.6$. Algunos autores están postulando la hipótesis de sismos en las Sierras Pampeanas, con magnitudes $M > 7.0$ (Costa, 2004) y aún de $M > 7.5$ (Costa et al., 2005). El principal argumento está basado en las mediciones de corrimientos superficiales observados en trincheras y en otras manifestaciones de actividad sísmica como paleo-avalanchas y paleo-licuación. Esos indicadores son menos robustos que la longitud de ruptura para la determinación de la capacidad sismogénica. Esto es evidente desde el punto de vista de la cantidad de observaciones, de la tendencia estadística y de la variabilidad del fenómeno en sí mismo. Así por ejemplo, los desplazamientos superficiales aflorantes generados por un sismo varían a lo largo de la traza, y la paleolicuación de suelos y los deslizamientos tienen una complejidad geotécnica no caracterizable solamente por la solicitud sísmica.

El mapa de rasgos neotectónicos (Figura 7) indica para la FSC, como antigüedad del movimiento: Holoceno y Pos-glacial (< 15000 años). Esta edad no tiene como fundamento una datación absoluta y es una estimación estratigráfica que no es compartida por otros tectonistas que ubican el último movimiento en alrededor de 800,000 años.

Tabla 3: Estimación de capacidad sismogénica de las principales fallas que influencian el sector Centro-Sur del Valle Longitudinal.

Falla	Tipo	Longitud de Traza	Longitud de Ruptura	Magnitud
FSC (AR 53)	Inversa	42 km	21 km	6.6
EL Molino (AR 50)	Inversa	51 km	25 km	6.7

Aceleraciones esperables para el MCE

Para valorar las aceleraciones en un sitio dentro del Valle Longitudinal, importa conocer cuál es la distancia a la fuente sismogénica, y en base a ello emplear distintas leyes de atenuación. La fuente más próxima es la Falla de la Sierra Chica FSC (AR 53d). A modo de ejemplo se puede analizar el caso de la presa de Río Grande, situada a unos 18 km de la FSC. La Tabla 4 presenta los valores que se alcanzan en base a distintas leyes de atenuación. Comparativamente se ha colocado una fuente lejana, situándola en el borde de la provincia sismotectónica (Valle Fértil, VF).

Tabla 4: Aceleraciones máximas para sismos locales (FSC: Falla Sierra Chica) y lejanos (VF: Valle Fértil).

Sismo	Falla	Magnitud	Distancia Epicentro (km)	Campbell et al. (2006)	Toro et al. (1997)	Idriss (2007)
Local	FSC	6.6	18	0.19 g	0.30 g	0.17 g
Lejano	VF	7.8	240	0.024g	0.024 g	0.04 g

Es de destacar que las expresiones de Campbell e Idriss pertenecen a la denominada nueva generación de leyes de atenuación, NGA, y han sido formuladas en base a bases de datos de aceleraciones de todo el mundo. La expresión de Toro pertenece al este de Estados Unidos.

Si se compara los valores obtenidos con los usados en el proyecto, $a = 0.22\text{g}$, se observa que las diferencias no son significativas, a pesar de haberse empleado en 1976, un método absolutamente diferente. Esta coincidencia es fortuita.

ESPECTROS DE RESPUESTA

Se ha realizado una comparación de las formas espectrales del sismo de 2003, con relación a las formas de las zonas sísmicas activas del oeste de Estados Unidos (WUS) y las formas de zonas sísmicas estables del centro de Estados Unidos (CEUS), propuestas por Silva, Youngs e Idriss en 2001. La Figura 8 muestra que las componentes horizontales del sismo de 2003 tienen formas espectrales que tienen características intermedias entre las formas planteadas.

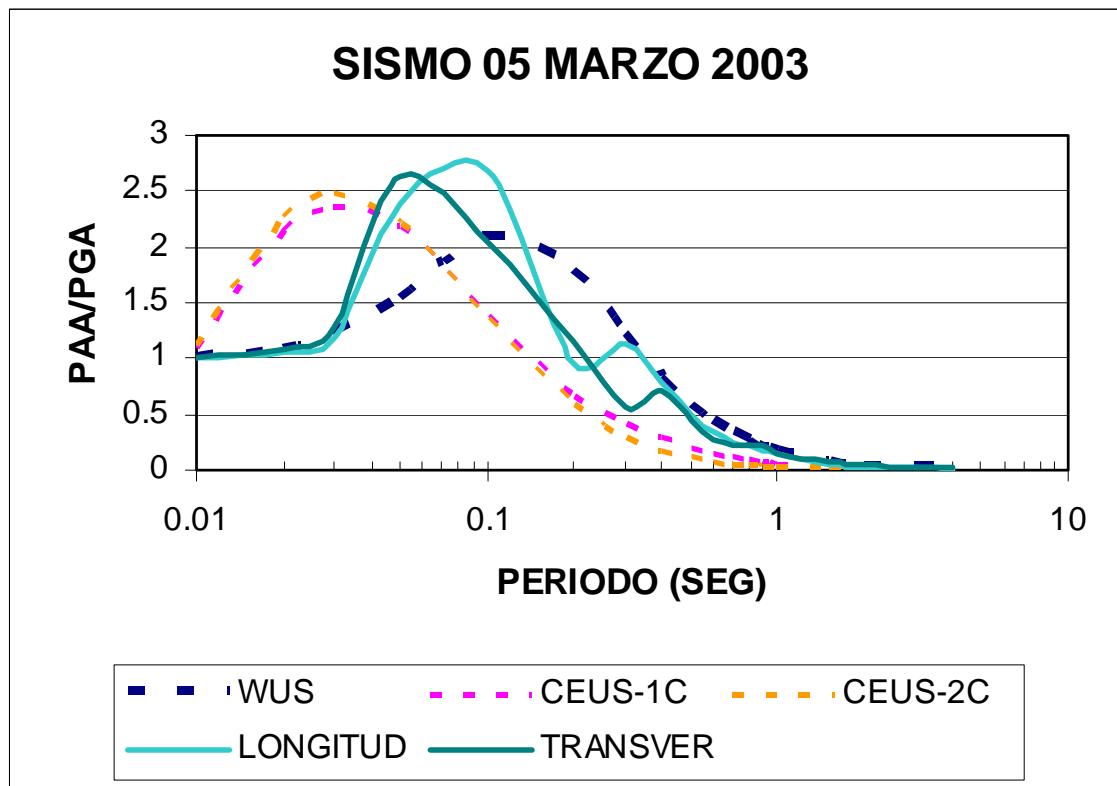


Figura 8: Comparación de los espectros de 2003 con las formas espectrales de zonas sísmicas activas (WUS) y estables (CEUS). PAA: Seudo Aceleración Absoluta, PGA Aceleración Pico Terreno (según Silva, Youngs e Idriss, 2001).

Una situación similar ha sido observada en sismos medidos en las Sierras Pampeanas de Tucumán. En base a ello se ha planteado una forma espectral intermedia para definir los sismos de verificación, mostrada en la Figura 9.

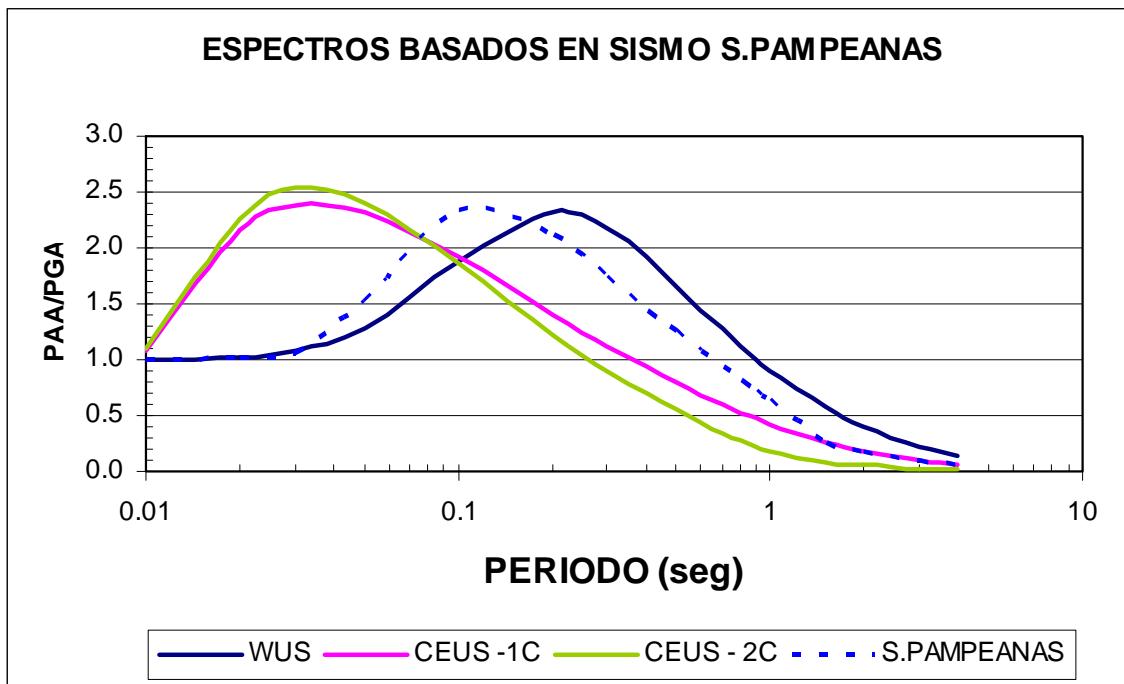


Figura 9: Forma Espectral planteada para las Sierras Pampeanas, comparada con las de zonas sísmicas activas (WUS) y estables (CEUS). PAA: Seudo Aceleración Absoluta, PGA Aceleración Pico Terreno (según Silva, Youngs e Idriss, 2001).

MECÁNICA DEL FALLAMIENTO

La determinación de la recurrencia de los sismos relacionados con la falla FSC es una tarea difícil de cuantificar debido a la baja actividad sísmica. Como los períodos de registros instrumentales e históricos son breves, se recurre al análisis de las manifestaciones tectónicas. En este caso la ausencia de dataciones geocronológicas de la falla impide una validación de las hipótesis que se puedan formular.

Los informes y antecedentes bibliográficos sólo especulan sobre la edad del fallamiento más reciente y la antigüedad que plantean van desde los 15,000 hasta los 2,000,000 de años.

Se sabe que la Sierra Chica se ha formado por alzamiento de bloques a lo largo del plano de falla de FSC (Figura 6). En otras palabras por una sucesión de sismos de tamaño y espacio temporal desconocido. El alzamiento ha sido recortado por procesos erosivos.

Asimismo, todos los Sierras Pampeanas se han generado debido a la subducción de la dorsal Juan Fernández junto con la placa de Nazca.

La curva de velocidad de alzamiento de la Sierra Chica y por lo tanto de movimiento de la FSC, presentaría un período de máxima actividad en la primera parte del intervalo considerado y posteriormente la actividad sería constante o decreciente, tal como fue planteado anteriormente.

Formulación de un modelo mecánico conceptual

Debido a las restricciones de información existente, la modelación temporal que se puede realizar es muy limitada. No obstante ello, se pueden plantear algunos escenarios que tengan racionalidad y un mínimo de validación.

En el caso particular de la Falla FSC, un tramo de interés en la zona sur del Valle, tiene un total de unos 42 km de longitud.

El alzamiento medio de la Sierra Chica a lo largo de ese tramo es de unos 270 metros aproximadamente, con relación al Valle. Si se tiene en cuenta los procesos erosivos, se puede hipotetizar que el alzamiento vertical acumulado ha estado en el orden de 325 m.

El afloramiento de la Falla frente a Santa Rosa (AR 53d de Figura 7) indica un buzamiento hacia el este de 30°. Considerando la altura media neta (alzamiento-erosión) alcanzada, se requiere un desplazamiento a lo largo del plano de falla de 650 m para justificar la altura actual de la Sierra Chica. Es decir que la sumatoria de desplazamientos provocados por sismos alcanza esa magnitud.

No se conoce la distribución de los sismos que lo provocaron, pero sí se puede hipotetizar que el proceso se ha realizado en 10.000.000 de años siguiendo la subducción de la Dorsal Juan Fernández.

Se puede estimar el desplazamiento medio provocado por un sismo en función de la magnitud. Existen algunas formulaciones empíricas que son regresiones de observaciones en distintas partes del mundo. Empleando la regresión de Wells y Coppersmith (1994), el desplazamiento promedio de un sismo responde a la ecuación:

$$M = 6.93 + 0.82 \log(AD) \quad (1)$$

donde AD está medido en metros.

Al desconocerse la distribución de los sismos, se puede plantear casos extremos para determinar el número de sismos capaces de ir sumando desplazamientos hasta alcanzar el alzamiento total. En un extremo, la energía necesaria se distribuye de tal manera de generar sismos de una sola magnitud o tamaño. En el otro, la energía total se reparte igualmente en sismos de distinta magnitud o tamaño.

Modelo de sismo único

Este modelo conceptual tiene como hipótesis extrema la existencia de un único tamaño de sismo causante de los desplazamientos. Es decir que la energía se manifiesta en forma constante y por lo tanto se producen sismos de una sola magnitud.

De ser este el caso, se puede aplicar la fórmula enunciada y computar cuantos sismos hace falta para llegar a sumar 650 m de desplazamiento. La Tabla 5 presenta el cómputo del intervalo medio entre sismos.

Tabla 5: Intervalos medios de tiempo de sismos con magnitud única.

Magnitud	Frecuencia Media	Tiempo Medio (años)
6.50	0.0002167	4,615
6.60	0.0001625	6,154
6.70	0.0001250	8,000
6.80	0.0000929	10,769
6.90	0.0000699	14,308
7.00	0.0000533	18,769

Si sólo se produjeron sismos de magnitud 6.5, el tiempo medio de separación sería de 4,615 años. Si por el contrario fueran de magnitud 7.0, se los observaría cada 18,769 años. En otras palabras para alcanzar los 650 metros en 10,000,000 de años, se requiere la frecuencia de sismos señalada en la Tabla 5.

Modelo de energía distribuida uniformemente

Un escenario en las antípodas del anterior es considerar que la liberación de la energía se produce en forma tal que se distribuye en forma uniforme entre sismos de distintas magnitudes. Esto significaría que en el intervalo considerado, la sumatoria de toda la energía de cada rango de magnitud es constante.

Para poder cuantificar la distribución es necesario considerar la relación existente entre magnitud de sismos y energía E. En este caso se ha optado por la clásica fórmula presentada por Gutemberg y Richter (Bullen et al., 1985):

$$\text{Log E (ergios)} = 11.8 + 1.5 \text{ Ms} \quad (2)$$

Aplicando esta expresión conjuntamente con la de desplazamiento de un sismo en función de la magnitud, se puede computar el número de sismos necesarios de cada magnitud, de manera tal que la sumatoria de desplazamientos sea igual a 650 m (Tabla 6). Es de destacar que los valores de la Tabla comienzan en una magnitud superior a 6 debido a que estos sismos son los que pueden producir fallamiento superficial y el cálculo se ha limitado a $M = 7$, en base a la longitud de la falla.

Asimismo, el significado de la Frecuencia y Tiempo Medio no es comparable con el de la Tabla 5, debido a que en este caso se requieren todos los sismos de la Tabla 6 para producir el alzamiento de 650 m, mientras que en la Tabla 5, se necesitan los de un sólo renglón.

Tabla 6: Distribución de sismos necesarios para producir el alzamiento de 650 m.

Magnitud	Número de Sismos	Frecuencia	Tiempo Medio (años)
6.1	2,888	0.0002888	3,463
6.2	2,045	0.0002045	4,891
6.3	1,447	0.0001447	6,909
6.4	1,025	0.0001025	9,759
6.5	725	0.0000725	13,785
6.6	514	0.0000514	19,472
6.7	364	0.0000364	27,505
6.8	257	0.0000257	38,852
6.9	182	0.0000182	54,880
7.0	129	0.0000129	77,519

Ensamble de datos instrumentales y modelos mecánicos

Para definir el sismo con una recurrencia por ejemplo de 10,000 años se puede plantear una curva de recurrencia donde se grafiquen los resultados de los modelos conceptuales descriptos y la información instrumental. Esta última se la ha extraído de los informes de riesgo sísmico de la Central Nuclear Embalse. Con los valores del modelo mecánico se tienden a cubrir en forma hipotética el tramo de la curva que tiene las frecuencias más bajas.

En la Figura 11 se han graficado los valores instrumentales y los puntos correspondientes a las frecuencias determinadas por el cómputo del modelo de Energía distribuida uniformemente, cuyos valores están calculados a partir de los números de sismos de la Tabla 6. Al respecto, es de destacar que para el caso del Modelo de Magnitud Única, al existir sólo sismos de una única magnitud, la representación gráfica se reduce a un punto y en la Figura 10 sólo se ha colocado el valor del sismo de $M = 6.6$.

La diferencia entre la curva del Modelo de Energía Uniforme y el punto del Modelo de Magnitud Única señala el hecho de que en el primero parte de la energía fue adjudicada a magnitudes superiores, en este caso $M > 6.6$.

Los puntos de las observaciones instrumentales indican menor actividad sísmica que los del modelo mecánico. Esto estaría indicando que al menos en los períodos instrumental (últimos 100 años) e histórico (últimos 500 años), la actividad tectónica ha sido inferior a la media. Las observaciones tectónicas también indican que en el último millón de años, la actividad habría sido inferior a la de los millones de años precedentes.

La definición del sismo de recurrencia de 10,000 años, puede leerse de la curva y su valor dependerá de cómo se realice el empalme entre la actividad instrumental y el modelo mecánico. Si se toma el punto de Magnitud = 7 que es un buen anclaje y se une con el dato instrumental de Magnitud = 6.5, se obtiene para el cruce correspondiente a 10,000 años, una $M = 6.6$. Si se realizan otro tipo de empalme, la Magnitud puede subir un poco pero dentro del intervalo $M = 6.6 - 6.7$.

Dentro de las limitaciones e incertidumbres de esta propuesta cualquiera de estos valores tiene el mismo significado estadístico.

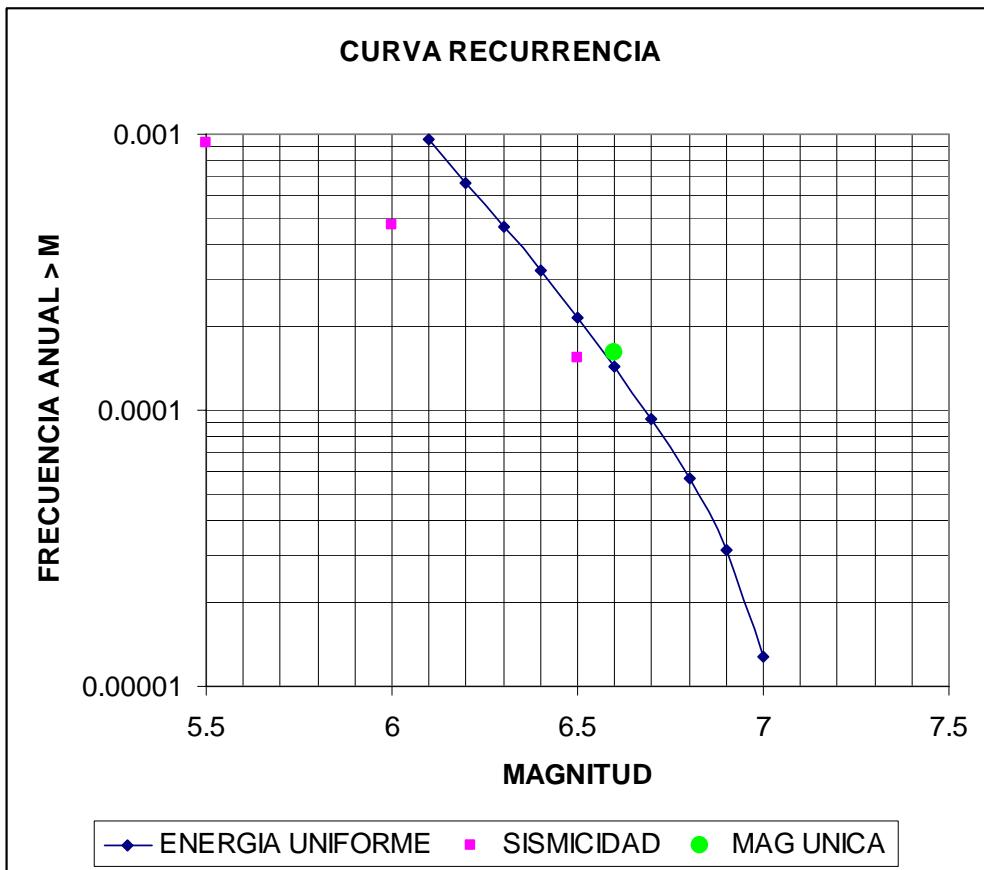


Figura 10: Recurrencia de la Falla de la Sierra Chica determinada con datos instrumentales e interpretación de un modelo mecánico de alzamiento de la Sierra Chica.

Desde el punto de vista mecánico un sismo de $M = 6.6$ corresponde a una rotura de la falla FSC del 50% de la longitud, mientras que un sismo de $M = 6.7$ corresponde a una rotura de 2/3 de la longitud total. En el análisis determinístico de Riesgo Sísmico, se toma ese entorno para definir el Sismo Máximo Credible. Por lo tanto es posible afirmar que el Sismo Máximo Credible coincide con el de una recurrencia de 10,000 años.

CONCLUSIONES

El conocimiento actual de la tectónica regional del centro de Argentina indica que las Sierras de Córdoba están controladas por la horizontalización de la placa de Nazca, motivada por la subducción de la dorsal Juan Fernández.

La región serrana donde se encuentra el Valle Longitudinal presenta rasgos neotectónicos mejor definidos que los publicados en la década de 1980. La falla de la Sierra Chica FSC es la más importante, aunque no la única, que presenta esos rasgos. A pesar de su importante desarrollo longitudinal, se encuentra segmentada, lo que motiva una reducción de su capacidad sismogénica.

Con la información de registros en la zona, se ha podido precisar las leyes de atenuación que pueden ser empleadas en los análisis. Asimismo, se han podido determinar formas espectrales cuando se las compara con el Oeste y Centro-Este de Estados Unidos.

Se ha postulado un modelo de alzamiento mecánico que es compatible con la información tectónica y topográfica existente en el valle. Esto podría dar indicios ciertos de la recurrencia de los sismos de $M = 6.6$, que son los que predominan en el Valle Longitudinal para el diseño de obras de infraestructura.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro de Vinculación de Ensayos No Destructivos y de Evaluación de Obras de Infraestructura Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, la disposición de información relacionadas con estudios de sismicidad en el Valle de Calamuchita.

REFERENCIAS

- Alvarado, P., Beck, S., Zandt, G., Araujo, M. y Triep, E. (2005a). "Crustal deformation in the south-central Andes backarc terranes as viewed from regional broad-band seismic waveform modeling", *Geophysical Journal International*, Vol. 163, pp. 580-598.
- Alvarado, P., Machuca, B. G. y Beck, S. (2005b). "Comparative seismic and petrographic crustal study between the Western and Eastern Sierras Pampeanas region (31°S)", *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol. 60, No. 4, pp. 787-796.
- Amos, A.J, Caligari, R.H. y Fiches, C. (1981). "Las fallas activas en la República Argentina", Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (ASAGAI), Actas I, pp. 235-242.
- Brooks B., Bevis M., Kendrick, E., Manceda, R., Lauria, E., Maturana, R. y Araujo, M. (2003). "Crustal motion in the Southern Andes (26°-36°S): Do Andes behave like a microplate?", *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Vol. 4, Nro. 10, 1085 .
- Bullen, K. E. y Bolt, B. A. (1985). *An Introduction to the Theory of Seismology*, 4th edition, Cambridge University Press, Australia, 499 pp.
- Campbell, K. W. y Bozorgnia, Y. (2006). "Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of PGA, PGV and SA at Selected Spectral Periods Ranging from 0.01-10.0 Seconds", *Interim Report for USGS Review*.
- Castano, J. C. y Bastias, H. E. (1981) "Análisis sismotectónico y su aplicación a la estimación del peligro sísmico". INPRES Pub. 10, San Juan, Argentina.
- Costa, C.H. (2004). "Neotectónica en Peligrosidad Geológica en Argentina. Metodología de análisis y mapeo. Estudio de Casos", ASAGAI (Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería), Pub. Esp. 4.
- Costa, C. H., Machette, M. N., Dart, R. L, Bastias, H. E., Paredes, J. D., Perucca, L. P., Tello, G. E. y Haller, K. M. (2000). "Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina", USGS Open-File Report 00-0108.
- Costa, C. H y Sagripanti, G. L. (2005). "Large Holocene earthquakes in the Sierras Pampeanas and surrounding plains: more likely than once thought", *ICSU-IGCP 490 Meeting*, Holocene environmental catastrophes in South America: From the lowlands to the Andes, pp 22.
- Decanini, L. y Rocca. R. J. (1989). "Estudio sobre leyes de atenuación para la región central de Argentina", Actas ASAGAI, Vol. IV, pp. 130-147.
- FEMA (2005). "Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of dams", FEMA 65, Washington, D.C., 75 pp.
- IAEA - International Atomic Energy Agency (2002). "Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants", Safety Guide No NS-G-3.3, Vienna, Austria.
- ICOLD Committee on Seismic Aspects of Dam Design (1989). *Selecting Seismic Parameters for Large Dams*, ICOLD Bulletin 72, Paris, France.
- Idriss, I. M. (2007). "Empirical model for estimating the average horizontal values of pseudo-absolute spectral accelerations generated by crustal earthquakes", Vol. 1, Interim Report Issued for USGS Review.
- Rocca, R. J, Decanini, L. D. y Prato, C. A. (1991) *Riesgo sísmico en el Valle Longitudinal de las Sierras de Córdoba*. Actas ASAGAI, Vol. VI, pp. 136-153.
- Silva, W. J., Youngs, R. R. y Idriss, I. M. (2001). "Development of design response spectral shapes for Central and Eastern U.S. (CEUS) and Western U.S. (WUS) rock site conditions", *Proceedings of the OECE-NEA Workshop on Engineering Characterization of Seismic Input*, Nov. 15-17, 1999, NEA/CSNI/R (2000) 2, Vol.1. pp. 185-268.
- Toro, G.R., Abrahamson, N. y Schneider, J.F. (1997). "Model of strong ground motions from earthquakes in central and eastern North America: best estimates and uncertainties", *Seismological Research Letters*, Vol. 68, pp. 58-73.
- USCOLD - United States Committee on Large Dams (1999). "Guidelines for Selecting Seismic Parameters for Dam Projects", Denver, Colorado.
- Wagner, L. S., Beck, S., Zandt, G. y Ducea, M. N. (2006). "Depleted lithosphere, cold, trapped asthenosphere, and frozen melt puddles above the flat slab in central Chile and Argentina", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 245, pp. 289-301.
- Wells, D.L. y Coppersmith, K.J. (1994). "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, pp. 974-1002.