



VARIACIÓN DEL ESTILO DE DEFORMACIÓN A LO LARGO DEL SISTEMA DE FALLA LA CANTERA, PRECORDILLERA CENTRAL, SAN JUAN, ARGENTINA

Deformational style variation along the La Cantera Fault System, Central Precordillera, San Juan, Argentina

Laura Perucca^{1,2}, M. Romina Onorato³, José Millán¹, Ariel Bustos¹ y Nicolás Vargas^{1,4}

¹Departamento Geología. FCEF y N-UNSJ. Av. Ignacio de La Roza y Meglioli 5400–San Juan, Argentina.

²CONICET, Gabinete de Neotectónica. INGEO-FCEF y N-UNSJ. Av. Ignacio de La Roza y Meglioli 5400-San Juan, Argentina.
lperucca@unsj-cuim.edu.ar

³Centro Austral de Investigaciones Científicas, CADIC, CONICET. Houssay 200 (9410) Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina

⁴CHISÑANCO SRL. Maradona 516 N, San Juan, Argentina

Abstract: The La Cantera Fault System (LCFS) is one of the main Quaternary structures in the Central Precordillera of San Juan, central-western Argentina, which extends for 47 km along the intermountain valley that separates the La Cantera and La Invernada mountain ranges, north of the San Juan River. The average fault trend is N20°E and dip to the west with angles varying between 15 and 30° W in the northern section, to approximately 40° W in the central section and up to 60° W in the southern segment. The fault affects the Pleistocene-Holocene alluvial sediments of to the western piedmont of the Sierra de La Cantera and is defined by a series of landforms typical of active compressive tectonics, including simple and compound counterslope fault scarps, unpaired alluvial terraces, sag ponds, flexural scarps, aligned springs, broom-shaped drainage patterns, river diversions, beheaded channels and changes of incision depths, sinuosity and river gradient along channels. Evidence of the Late Quaternary reactivation in the LCFS, a thrust with an eastern vergence, is here presented. As a result, a series of tectonic events and landscape modifications are described. Several natural trenches were identified and analyzed and three of them were selected. It was observed that the fault cuts Holocene deposits in the north, while to the south affects older levels; forming a blind thrust. Two colluvial wedges preliminary implying two seismic events during the Holocene were recognized in north and central trenches and only one in the southern one. Based on the geomorphologic, stratigraphic and structural characteristics analyzed, LCFS is considered a relevant seismogenic source for the city of San Juan (> 700,000 inhabitants), in addition to the three dams built along the San Juan River (10, 35 and 40 km away from the fault).

Key words: Quaternary, thrust, palaeoseismicity, morphotectonic, Central Precordillera.

Resumen: El Sistema de Falla La Cantera (SFLC) es una de las principales estructuras activas en el ámbito de la Precordillera Central de San Juan, centro-oeste de Argentina, que se extiende por 47 km a lo largo del valle que separa las sierras de La Cantera y La Invernada, al norte del río San Juan. La orientación promedio de las fallas es N20°E y buzan al oeste entre 15° y 30° en el tramo norte, aproximadamente 40° O en el tramo central y hasta 60° O en el extremo sur. La estructura es fundamentalmente un cabalgamiento que deforma y desplaza todos los niveles de abanicos aluviales del Pleistoceno y Holoceno pertenecientes al piedemonte occidental de la sierra de La Cantera y está definida por una serie de geoformas típicas de fallamiento activo de carácter compresivo, entre las que se destacan escarpes de falla a contrapendiente, simples y compuestos, escarpes flexurales, terrazas fluviales escalonadas, lagunas de falla, fuentes alineadas, redes en rastrillo, cauces desplazados, obturados, colgados y con diferentes grados de incisión. Se presentan así, evidencias sobre la reactivación cuaternaria tardía del SFLC, un cabalgamiento de vergencia oriental, enlazando los episodios tectónicos con las modificaciones del paisaje. A lo largo de todo su trazado se identificaron y analizaron numerosas trincheras naturales, y tres de ellas fueron analizadas. En ellas se pudo observar cómo la falla corta los depósitos holocenos en el extremo norte, mientras que hacia el sur afecta a niveles más antiguos, constituyendo



un cabalgamiento ciego. En las trincheras seleccionadas en el tramo norte y central se identificaron dos cuñas coluviales que permitieron interpretar de forma preliminar dos eventos sísmicos durante el Holoceno para el sector, mientras que en el tramo sur, sólo fue posible reconocer una cuña coluvial, relacionada con un evento sísmico. Sobre la base de las características y parámetros geomorfológicos, estratigráficos y estructurales analizados, se considera al SFLC como una fuente sismogénica de importancia para la ciudad de San Juan (> 700.000 habitantes), y para los tres embalses construidos a lo largo del río San Juan (a 10, 35 y 40 km de distancia del SFLC).

Palabras clave: Cuaternario, cabalgamiento, paleosismicidad, morfotectónica, Precordillera Central.

Perucca, L., Onorato, M.R., Millán, J., Bustos, A. y Vargas, N. (2014): Variación del estilo de deformación a lo largo del sistema de falla La Cantera, Precordillera Central, San Juan, Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 27(2): 69-79.

Entre los 28° y 32° S la Precordillera Central muestra evidencias de una sismicidad superficial reciente. Esta región se caracteriza por concentrar gran parte de las deformaciones cuaternarias conocidas en Argentina que están asociadas a fallas subparalelas con rumbo general meridional y muy similar a las del resto de las estructuras andinas. Los terremotos históricos destructivos más importantes del país se produjeron en esta región, asociados a rupturas superficiales, como los terremotos de 1944 ($M_s = 7.4$), 1952 ($M_s = 6.9$) y 1977 ($M_s = 7.4$) (Perucca *et al.*, 2006).

El Sistema de Falla La Cantera (SFLC) es una de las principales estructuras activas en el área de la Precordillera Central. Se trata de un cabalgamiento con rumbo general norte-sur, dirección de transporte hacia el este que buza al oeste con un bajo ángulo (Millán y Perucca, 2011). La falla afecta a todos los niveles aluviales del piedemonte occidental de la sierra homónima y modifica la red de drenaje actual.

El área de estudio se ubica aproximadamente en el centro de la Provincia de San Juan (31° 05' S y 69° O) en el departamento de Ullum, al noroeste de la ciudad de San Juan. La zona corresponde a la provincia geológica Precordillera Central, situándose concretamente en el piedemonte occidental de la sierra de La Cantera (Fig. 1a, b y c). El valle de La Cantera se encuentra entre dos cordones montañosos que se alinean con dirección norte-sur, la sierra de La Invernada (3500 m snm) por el oeste y la sierra de La Cantera (3000 m snm) por el este. Este valle se extiende desde el Puesto de Pachaco sobre el río San Juan (1190 m snm) en el sur, hasta la Pampa de Gualilán (1620 m snm) en el norte.

En el piedemonte occidental de la sierra de La Cantera, Millán y Perucca (2011) reconocieron afloramientos correspondientes al miembro inferior de la Formación Pachaco del Eoceno superior-Mioceno (Milana *et al.*, 1993). Las rocas neógenas se disponen en forma homoclinal con buzamientos al oeste y dirección norte-sur. El buzamiento medido en la zona varía desde 21° O en la porción oriental a aproximadamente 50° O en las cercanías de la zona de falla. Estos autores además describieron 3 niveles aluviales cuaternarios afectados por el SFLC y dispuestos en forma discordante sobre las rocas del Neógeno.

En el presente trabajo se efectúa un análisis de las dife-

rentes evidencias morfotectónicas a lo largo del piedemonte occidental de la sierra de La Cantera y asociadas al SFLC, además de relacionar estos rasgos con el marco neotectónico de la región y su estilo de deformación.

Marco Tectónico

La Precordillera Central se corresponde con los depósitos de una plataforma calcárea ordovícica. La base de los corrimientos que caracterizan al sector central está formada por rocas carbonáticas de plataforma, de edad Ordovícico Inferior (Formación San Juan). En discordancia se apoyan depósitos principalmente pelíticos del Silúrico (Formaciones Tambolar y Los Espejos) y areniscas del Devónico Inferior depositadas en ambientes someros (Formación Talacasto) (Fig. 1 a, b). Los depósitos marinos turbidíticos correspondientes a la cuenca de antepaís del Devónico inferior a medio desarrollan un frente deltaico que progresa desde el este al oeste (Formación Punta Negra). En aparente concordancia se apoyan las sedimentitas neopaleozoicas correspondientes a depósitos continentales y marinos someros (Ramos, 1999).

Las rocas del Neógeno de la Formación Pachaco que afloran en el área, se disponen en discordancia angular sobre rocas del Paleozoico, y también han sido involucradas en los plegamientos y cabalgamientos de la Precordillera (Fig. 1a, b). La mayor parte de las estructuras andinas han sido consideradas reactivaciones de estructuras antiguas originadas durante el Carbonífero-Pérmico (Alonso *et al.*, 2005). La deformación andina ha sido datada como Mioceno a reciente, con el avance del frente orogénico desde el oeste hacia el este (Jordan *et al.*, 1993).

Allmendinger *et al.* (1990) y von Gosen (1992) caracterizaron a la Precordillera Central por su tectónica epidérmica y su marcada vergencia hacia el este. Uno de los rasgos más notables es el continuo incremento del buzamiento de los cabalgamientos desde 30° en su sector frontal, hasta vertical y/o volcado (retrocabalgamientos) en el sector más occidental. Estructuralmente es un cinturón de pliegues y fallas de piel fina constituido por cabalgamientos con niveles de despegue principalmente en las secuencias cambro-ordovícicas (Alonso *et al.*, 2005).

Metodología

Los métodos aplicados para cartografiar el valle del río La Cantera estuvieron basados en la interpretación y análisis digital de los rasgos geomorfológicos del relieve, haciendo uso de fotografías aéreas de escala 1:30000 e imágenes del satélite *Landsat TM* de 30 y 15 m de resolución y del *Google Earth*. Además, se efectuaron vuelos de bajo ángulo a lo largo de toda la falla, con el fin de destacar sus características geomorfológicas más relevantes. Se efectuó un análisis morfotectónico y de la red de drenaje. La elaboración de un mapa geomorfológico integrando todos estos datos, permitió caracterizar la morfología del SFLC.

Con el fin de efectuar una mejor descripción de las estructuras, morfologías y también de los sedimentos asociados al SFLC, se dividió la traza de norte a sur en tres tramos, denominados Norte, Central y Sur, efectuando un análisis morfotectónico de cada uno de los tres sectores (Fig. 1c).

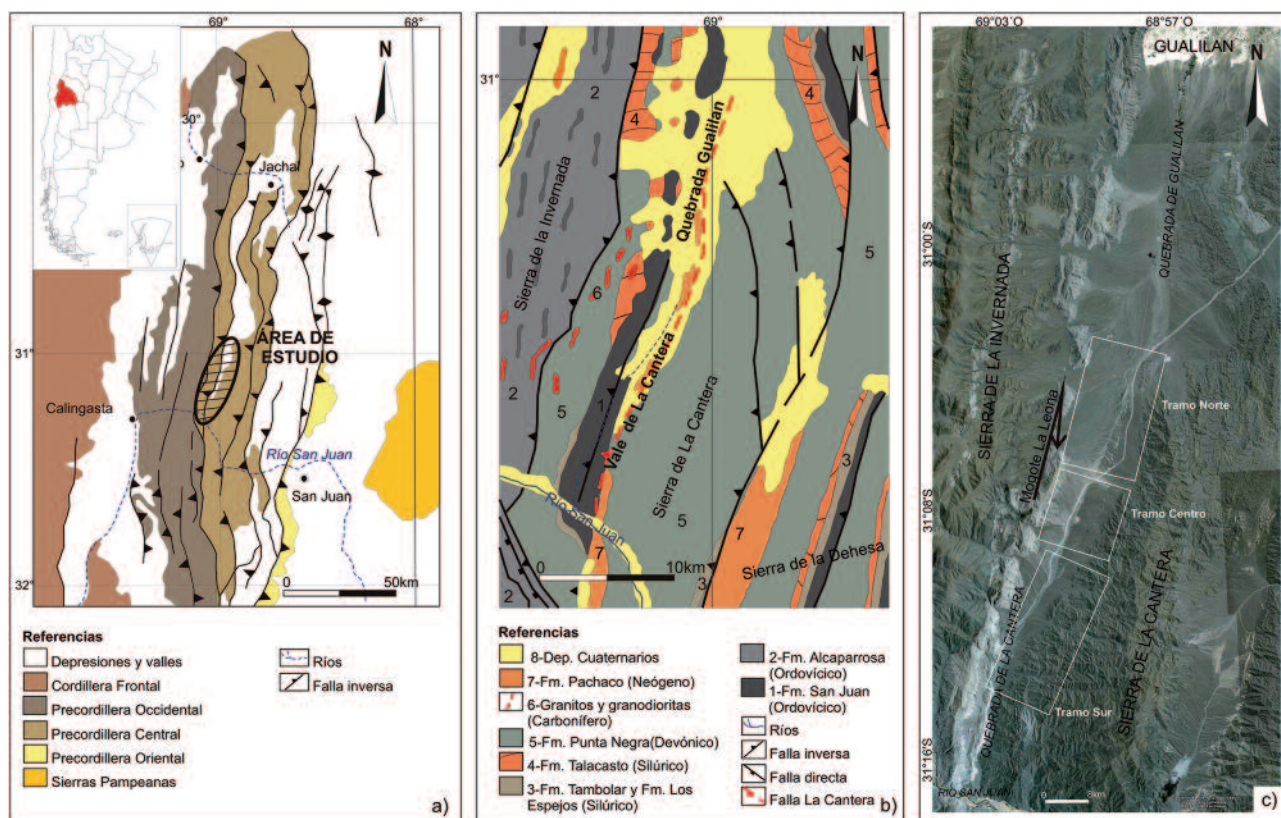
Las tareas de campo consistieron en un análisis detallado de los indicadores morfotectónicos planares y lineales tales como las terrazas, abanicos aluviales con pendientes anómalas, con escarpes en contra de la pendiente, cauces desplazados, obturados, colgados y con diferentes grados de incisión, fuentes y vegetación alineadas, entre otras; y en la interpretación de las trincheras naturales identificadas en cauces naturales ubicadas en los tramos norte, centro y sur del SFLC, a fin de conocer la cinemática de la falla y los niveles aluviales afectados.

Morfotectónica

El análisis de las características de la red de drenaje constituye una herramienta de suma importancia en el estudio de la actividad tectónica reciente en sistemas de pliegues y cabalgamientos (*fold and thrust belts*) ya que los ríos son sumamente sensibles a los procesos tectónicos verticales relacionados con estas estructuras (Audemard, 1999).

Los ríos y arroyos ubicados en el piedemonte oriental de la sierra de La Invernada y occidental de la sierra de La Cantera, drenan a partir del mogote de La Leona hacia el norte, a la depresión endorreica de la Pampa de Gualilán, mediante el río Gualilán (Fig. 1c). Al sur del mogote, los arroyos provenientes de la sierra de La Invernada y de la sierra de La Cantera drenan hacia el sur por la quebrada de La Cantera, hasta el río San Juan (Fig. 1a).

El piedemonte occidental de la sierra de La Cantera tiene un ancho promedio de 1,64 km, que disminuye a sólo 400 m en la zona sur, donde los arroyos desembocan en el río San Juan. En este área predominan los abanicos aluviales con evidencia de fallamiento activo asociado al SFLC. La expresión morfotectónica de este sistema de fallas activas subparalelas incluye escarpes de falla a contrapendiente, simples y compuestos, terrazas escalonadas, escarpes flexurales, discordancias progresivas, plegamiento reciente en depósitos cuaternarios y diversas anomalías en la red de drenaje (Fig. 2a, b, c). La altura de los escarpes de falla varía entre 0,30 m y 10 m, encontrándose las mayores



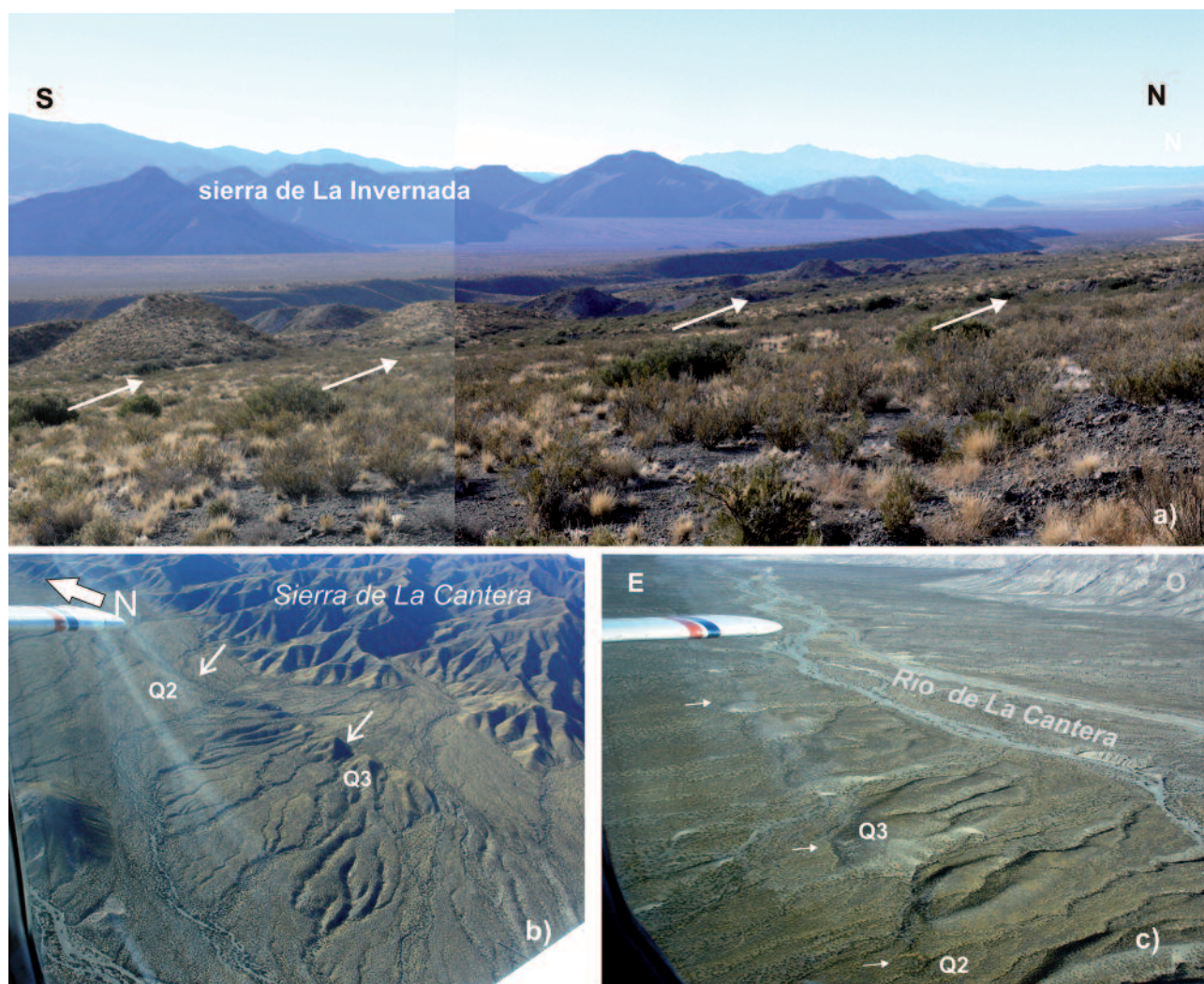


Fig. 2. a) Vista al noroeste del tramo norte del SFLC con escarpes a contrapendiente subparalelos, simples y compuestos afectando a los niveles aluviales procedentes de la sierra de La Canterra. b) Fotografía aérea oblicua del tramo central del SFLC. En este sector se encuentran las mayores alturas en los escarpes. El SFLC se presenta en un solo trazo que afecta los niveles aluviales Q₃ y Q₂, señalados por las flechas blancas. Es posible apreciar las anomalías en la red de drenaje que atraviesa la falla. c) Fotografía aérea oblicua del tramo sur del SFLC, vista al suroeste. El escarpe a contrapendiente, indicado por las flechas blancas, afecta a los niveles Q₃ y Q₂. La red de drenaje se encuentra fuertemente controlada por la falla, con un aumento en el grado de incisión de los cauces y la presencia de cauces colgados, desviados y lagunas de falla (*sag ponds*).

elevaciones en el tramo central. Las evidencias morfotectónicas en los depósitos cuaternarios indican una actividad tectónica progresiva hacia el tramo norte de la falla, en la que se encontró la evidencia más reciente (holocena y posiblemente histórica).

Entre las evidencias directas clásicas, registradas en el área, se destacan los escarpes de falla a contrapendiente, simples y compuestos, con alturas que varían entre 0,5 m y 10 m, los cuales corresponden a los desplazamientos verticales acumulados durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno. Los desplazamientos mínimos medidos sobre el plano de falla en las trincheras naturales varían entre 0,50 m y 1,80 m (Fig. 2). Las fallas superponen rocas de edad neógena sobre depósitos aluviales cuaternarios (Fig. 3a).

Las mayores elevaciones en los escarpes se reconocieron en el tramo central de la falla. Los escarpes simples señalan la existencia de una falla, mientras que los compuestos indican varias fallas relativamente próximas o

varios eventos para una misma falla que ha funcionado de manera intermitente en el tiempo (Fig. 3b).

Es muy notable la presencia de escarpes flexurales en los tramos central y sur del sistema de falla, dado que habitualmente ésta se expresa cortando los abanicos aluviales que provienen de la sierra La Canterra (Fig. 3c). Esta flexura topográfica es interpretada como la expresión superficial de un cabalgamiento ciego, cuyo desplazamiento se acomoda hacia arriba, en un pliegue de propagación de falla de geometría monoclinial (Stein y Yeats, 1989).

También se ha reconocido el basculamiento y plegamiento en los depósitos aluviales asignados al Pleistoceno tardío indicando la simultaneidad entre la deformación tectónica activa (levantamiento) y la sedimentación durante todo este periodo (Gidon, 1987; Keller y Pinter, 1996). En las proximidades de la falla los estratos, que aparecen limitados por varias discordancias progresivas, presentan variaciones de su buzamiento que oscilan entre 70° O y 20° O (Fig. 3d).



Fig. 3. a) Vista al oeste del cabalgamiento La Canterra en el sector norte. La falla pone en contacto rocas del Neógeno (Ne) sobre depósitos aluviales del nivel Q_2 con un buzamiento de 10° O. b) Escarpe compuesto a contrapendiente en el tramo sur, en el nivel Q_2 donde se pueden observar varios escalones indicadores de posibles múltiples eventos para una falla o más probablemente, de varias fallas imbricadas que rompieron en un mismo evento. c) Vista al sur del piedemonte occidental de la sierra de La Canterra y escarpe flexural a contrapendiente. d) Discordancia progresiva en el nivel Q_2 , en el tramo central del SFLC. e) Terrazas escalonadas en el labio elevado del SFLC.

En los sectores situados sobre el bloque elevado de la falla se identificó el desarrollo desigual de tres niveles de terrazas aluviales escalonadas (*unpaired terraces*). Éstas se localizan principalmente en la margen derecha de pequeños tributarios y a lo largo de todo el sistema de falla (Fig. 3e). Además se reconocieron pendientes anómalas en los abanicos (contrapendientes que dan lugar a formas convexas o pendientes muy inclinadas en el bloque levantado por la falla) y fuentes alineadas y vegetación hidrófita y freatófita asociada a la falla.

A lo largo de todo el trazado del cabalgamiento se ubicaron pequeñas lagunas de falla (*sag ponds*). Estas son pequeñas depresiones cerradas rellenas de sedimentos finos (limo-arenosos) formadas cuando el movimiento de la falla

La Canterra causó el hundimiento de una cuña de terreno o generó una pequeña cuenca a lo largo del escarpe, a contrapendiente con obturación de uno o varios cauces (Fig. 4a, b).

Una evidencia morfológica muy significativa de la presencia de este sistema de fallas, se encuentra en el trazado de los ríos que surcan la ladera de la sierra de la Canterra, con cauces desviados y colgados, cauces con mayor densidad, sinuosidad e incisión una vez que sobrepasan la falla, y una red de drenaje en rastrillo (Fig. 4c, d, e, f).

Se examinaron a lo largo del trazado numerosas trincheras naturales en las que se pudo analizar la cinemática del SFLC y su relación con los procesos sedimentarios vigentes. Dichas trincheras muestran fallas con un trazado

promedio de N10°E en su porción norte, N30°E en su tramo central y N25°E en el extremo sur y un buzamiento variable entre 10° en el tramo norte hasta 25° a 63°O en el tramo sur. Además, las fallas afectan a depósitos de edad holocena en la parte norte, mientras que en el tramo sólo deforman los conglomerados aluviales del Pleistoceno, comportándose como un cabalgamiento ciego.

Los tres tramos identificados y analizados se describen a continuación:

Tramo norte. En este tramo se identificaron 3 niveles de abanicos aluviales cuaternarios que fueron clasificados como Q₁ para los correspondientes a los cauces actuales, Q₂ para los niveles aluviales intermedios y Q₃ para los más

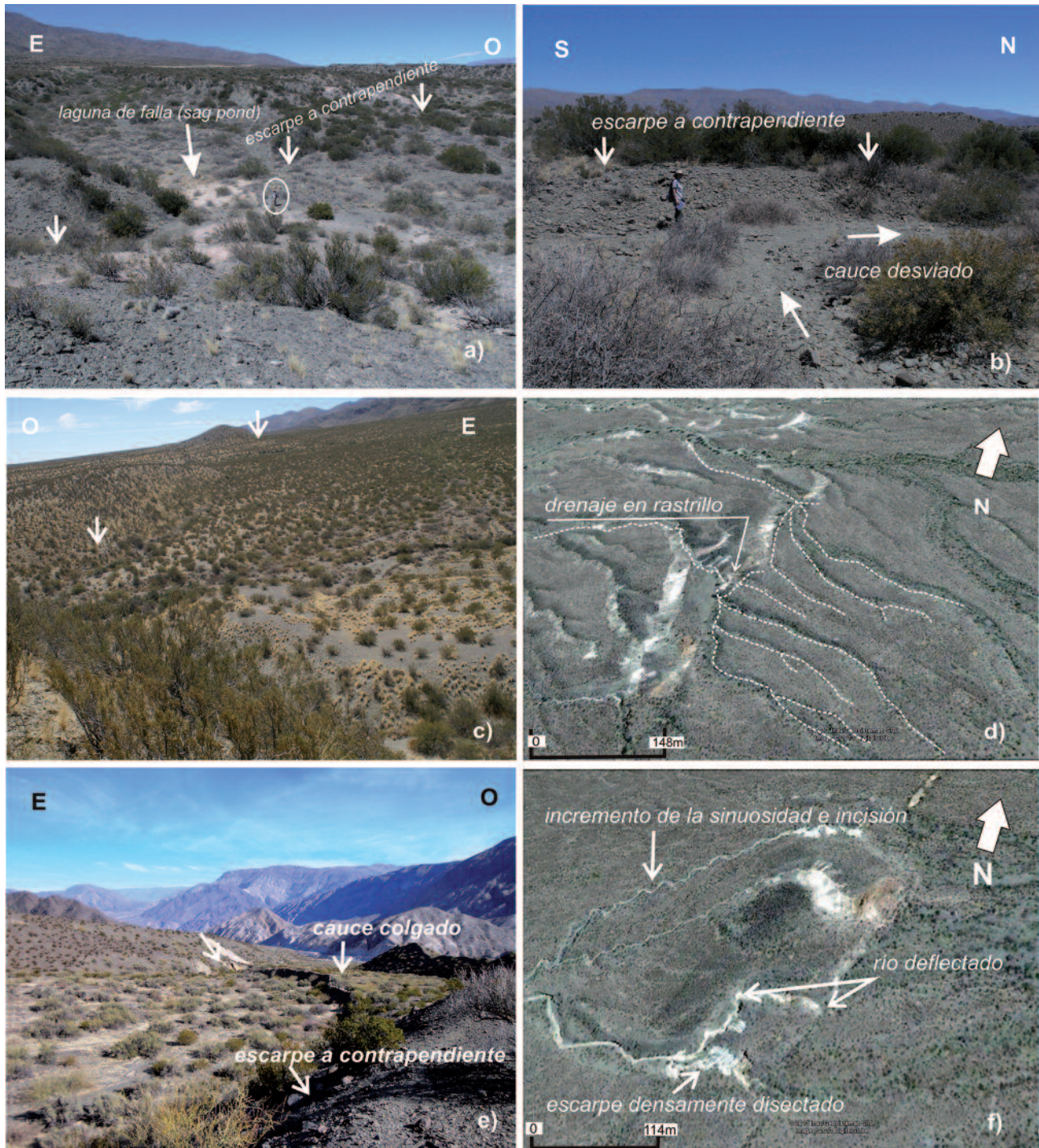


Fig. 4. a) Laguna de falla en el extremo norte del SFCL. El escarpe a contrapendiente afecta el nivel actual Q₁. b) Vista al oeste del sector anterior en el que se observa el escarpe que desvía un pequeño tributario actual. c) Vista al norte del escarpe en el tramo central del SFCL. Es posible observar que en este tramo se encuentran los mayores desplazamientos verticales de todo el sistema. d) Imagen de *Google Earth* en las que se aprecian las anomalías en la red de drenaje, tal como la red de drenaje en rastrillo y cauces desviados y colgados en el bloque elevado de la falla. e) Vista al sur del escarpe del SFCL en el tramo sur. La falla desvía un cauce hacia el sur, quedando en el bloque elevado el paleocanal “colgado”. f) Imagen *Google Earth* en la que se aprecia el cambio en el grado de incisión y el aumento en la sinuosidad de los cauces al atravesar la falla.

antiguos (Fig. 5a). La edad de los niveles fue determinada de forma preliminar por correlación con los niveles aluviales datados por Siame *et al.* (1997), y con las edades determinadas por Perucca y Martos (2012) en dos valles paralelos ubicados al oeste. A partir de su posición topográfica, presencia de barniz del desierto y grado de incisión de los cauces fluviales relacionados (Bastías, 1986; Espízua, 2002), se considera al nivel Q₃ como el más antiguo y se le asigna una edad Pleistoceno superior. Además, Siame *et al.* (1997) por datación cosmogénica, obtuvieron edades que oscilan entre los 100.000±21.000 y 380.000±78.000 años para los niveles aluviales correlacionables con el nivel Q₃ del área de estudio.

El nivel Q₃ se dispone en discordancia angular sobre los depósitos de la Formación Pachaco (Neógeno). La composición litológica de los clastos corresponde a grauvacas con tamaños que varían desde 2 cm hasta 15 cm, que provienen de los afloramientos silúrico-devónicos de la sierra de La Cantera. Los clastos son angulosos a subredondeados y en distintas secciones son clasto-soportados. Se puede reconocer sobre las superficies de estos niveles, pavimento y barniz del desierto, este último no se desarrolla de igual forma sobre toda la superficie, hallándose parches de colores más claros. Además se observan cantos con signos de termoclastia y/o crioclastia.

El nivel Q₂ se encuentra topográficamente más bajo que el nivel Q₃, y ha sido asignado tentativamente en este trabajo al Pleistoceno superior-Holoceno, por correlación con los niveles aluviales más recientes datados por Siame *et al.* (1997) y cuyas edades oscilan entre 37.000±8.000 y 100.000±21.000 años; y a partir de la edad obtenida por ¹⁴C de un suelo incipiente hacia el techo de la secuencia aluvial que arrojó 4.580 ± 50 años (Millán y Perucca, 2011). Se compone de cantos angulosos a subredondeados de grauvacas procedentes de la sierra de La Cantera. El tamaño de los clastos varía desde pocos centímetros hasta 50 cm en algunos casos. Constituyen depósitos clasto-soportados de colores grisáceos similares al nivel Q₃, sin desarrollo de barniz o pavimento del desierto en la superficie.

El nivel Q₁ es el nivel aluvial más reciente (Holoceno), y está representado por los depósitos de los cauces actuales estacionales que surcan los abanicos aluviales de la zona. El relleno sedimentario de los cauces presenta facies de gravas con granulometría diversa intercaladas con facies de arena. Los cauces que atraviesan el SFLC de este a oeste se componen de gravas de composición grauváquica de tamaño variado con un promedio de 6 cm, de bordes subredondeados a subangulosos. El cauce principal que drena todo este sistema aluvial de sur a norte es el río Gualilán, que contiene además clastos de caliza con tamaños entre 3 y 10 cm que provienen de los mogotes del borde oriental de la sierra de La Invernada.

La red de drenaje identificada en este sector es dendrítica divergente, típica de abanicos aluviales. Sin embargo, se producen anomalías en el patrón de drenaje cuando los arroyos atraviesan la traza de la falla La Cantera, aumentando el grado de incisión y sinuosidad de los cauces y modificando la red de un diseño divergente a otro de tipo rastrillo.

La red de drenaje posee en este sector las mayores evidencias de control por el SFLC, con un diseño en rastrillo, cauces obturados, colgados y desviados, además de cambios en el grado de incisión, sinuosidad, pendiente y densidad en los cursos al cruzar el plano de la falla. Esto se debe a que los pequeños arroyos tributarios son susceptibles a cualquier modificación sutil de la topografía en función de su tasa de erosión (Audemard, 1999). Aguas arriba de la traza de la falla, la red presenta un diseño en rastrillo y en el bloque elevado de la falla los cauces menores de la red dendrítica se encuentran notablemente incididos, son sinuosos y la red es más densa.

Perucca *et al.* (2014) efectuaron con GPS diferencial, perfiles longitudinales de los cauces que atraviesan el SFLC y señalaron el alejamiento del perfil de éstos con respecto al perfil teórico de equilibrio, estando todos los arroyos afectados por inflexiones, que estarían condicionadas por la traza de la falla perpendicular a ellos. Observaron que la sinuosidad es mayor cuanto menor es la pendiente del perfil del río y viceversa. Este grado de sinuosidad de los cauces estaría muy relacionado con el valor de la pendiente del perfil longitudinal de cada canal, dado que las pendientes bajas dan lugar a índices de sinuosidad altos o cauces meandriformes.

En este tramo se reconoció también la evidencia más reciente de actividad holocena, con la presencia de lagunas de falla al pie del escarpe, fuentes alineadas y tres niveles de terrazas escalonadas, por encima del cauce actual.

Se identificaron al menos cinco escarpes paralelos que afectan a unidades Pleistoceno – Holoceno, desarrollados en una banda de sólo 600 m de anchura. El escarpe más alto es el occidental y posee una altura aproximada de 8 m, disminuyendo el resto gradualmente su altura hasta sólo 30 cm. Esto indicaría la existencia de múltiples eventos sísmicos asociados a una sola falla o probablemente, varias fallas subparalelas imbricadas. Hull (1987) señaló que la zona de deformación relacionada con terremotos compresivos comúnmente varía entre 10 m y 5 km de ancho, y está constituida generalmente por rupturas múltiples. Esto es así porque los empujes distribuyen el deslizamiento sobre múltiples fallas imbricadas (Mc Calpin, 2009).

El rumbo medido en las fallas en este tramo es N16° E y el buzamiento varía entre 10 y 30° O. Las fallas inversas superponen rocas neógenas sobre el conjunto de depósitos aluviales cuaternarios. En una de las cinco trincheras analizadas en este tramo se identificaron dos cuñas coluviales con clastos dispuestos caóticamente, y otro nivel en el cual los clastos se alinean paralelos al plano de la falla (Fig. 5b). La falla afecta en este sector al nivel Q₂. Millán y Perucca (2011) interpretaron cada una de estas cuñas en relación con diferentes reactivaciones de la falla.

Por último se habrían depositado los materiales aluviales que cubren todo el perfil y que se encuentran ligeramente arqueados lo cual indica que en un nuevo desplazamiento, la falla no llegó a cortar la superficie topográfica, constituyendo un cabalgamiento ciego. Millán y Perucca (2011) dataron por ¹⁴C un nivel edáfico incipiente afectado por la falla, obteniendo una edad de 4580 ± 50 años, lo que correspondería al Holoceno medio. Final-

mente, habría ocurrido el último evento histórico (1924) que podría estar reflejado en un pequeño cauce actual, que fue desviado por un escarpe de sólo 0,30 m (Fig. 4b).

Tramo central: En este tramo se pudieron reconocer 4 niveles aluviales cuaternarios, los niveles Q_1 a Q_3 descritos en apartados anteriores, más un nivel Q_4 más antiguo con caracteres relictos que sólo se encuentra en este sector y que podría correlacionarse a partir de sus características topográficas, presencia de pavimento y barniz, con los niveles datados por Siame *et al.* (1997) en <700.000 años. Este nivel ocupa una posición topográfica más elevada respecto al nivel Q_3 y presenta una pendiente anómala con un ángulo elevado hacia el oeste, debido a la influencia del SFLC (Fig. 5c).

La composición litológica de los clastos de Q_4 es variada ya que además de los clastos de grauvacas, desde 2 cm hasta bloques de 30 cm, con formas angulosas a subredondeadas y procedentes de la sierra La Cantera, también se observan clastos de caliza subredondeados. El tamaño de los clastos de caliza varía desde los 10 cm hasta bloques que superan los 70 cm. Es destacable que también aparecen clastos de granodioritas y tonalitas de 10 a 50 cm cuyo aporte se interpreta como procedente de un cuerpo intrusivo carbonífero que aflora al oeste denominado Granodiorita de la Leona por Gallastegui *et al.* (2008), en la sierra de La Invernada.

La traza principal del SFLC en este tramo es rectilínea, con escarpes flexurales, simples y compuestos a contrapendiente, encontrándose en este tramo, los mayores desplazamientos de todo el trazado (hasta 10 m).

La red de drenaje muestra también numerosas anomalías por la presencia de la traza principal del SFLC, con cauces obturados, desviados, colgados, cambios en la sinuosidad e incisión, redes en rastrillo, entre otras.

Se consideraron tres trincheras naturales, de las cuales se describe en este trabajo la que posee evidencias más claras del funcionamiento del SFLC (Fig. 5d). En esta trinchera las rocas del Neógeno se encuentran sobre los depósitos Cuaternarios correspondientes al nivel Q_2 . El rumbo de la falla es de $N20^\circ E$ y su buzamiento de $40^\circ O$; presenta en este caso un desplazamiento sobre el plano de falla de 55 cm. Se pueden advertir también flexiones en algunos niveles de gravas, relacionados con la presencia de pliegues por propagación de falla y que sobre el plano de la falla, los clastos se orientan con su eje mayor paralelo al mismo. Se estima que esta falla puede prolongarse casi hasta la superficie, afectando a los niveles que se disponen en la porción superior de la misma, que muestran también una suave inflexión. En este sector se encontraron discordancias progresivas con valores angulares buzando entre 70° y $20^\circ O$ (Fig. 3d) y tres niveles de terrazas en el labio elevado de la falla (Fig. 3e).

La presencia de dos cuñas coluviales en esta trinchera indicaría al menos dos eventos sísmicos para este tramo de la falla (Fig. 5d).

Tramo sur: En el tramo sur del piedemonte de la sierra de La Cantera también se identificaron tres niveles de aba-

nicos aluviales, siendo el nivel aluvial Q_2 el de mayor extensión superficial afectado por el SFLC (Fig. 5e).

Se reconocieron tres escarpes subparalelos, simples y compuestos a contrapendiente, cuyas alturas varían entre 0,50 m y casi 5 m. Estos escarpes controlan la red de drenaje del mismo modo que en los sectores centro y norte. También se identificaron en este tramo lagunas de falla y dos niveles de terrazas escalonadas en el labio elevado de la falla.

En las dos trincheras naturales reconocidas en el sector sur no se observó una ruptura superficial, aunque el análisis de la geometría de la deformación es difícil por el escaso desarrollo de la estratificación en los depósitos aluviales cuaternarios; aun así, fue posible reconocer una suave inflexión en estos depósitos a través de la orientación del eje mayor de los clastos que muestran leves inclinaciones al oeste y por lo tanto un buzamiento a contrapendiente de algunos niveles de estos abanicos aluviales.

En una de las trincheras (Fig. 5f) se reconocieron conglomerados correspondientes al nivel aluvial Q_2 fuertemente deformados. El buzamiento medido para la falla en esta trinchera es de $63^\circ O$ con un rumbo $N10^\circ E$. La falla coloca rocas neógenas de la Formación Pachaco sobre los depósitos cuaternarios del nivel aluvial Q_2 . La deformación en el conglomerado permite interpretar pliegues de arrastre (*drag folds*), generados en el bloque inferior de la falla. En esta trinchera sólo fue posible reconocer una cuña coluvial, relacionada con un evento sísmico.

Discusión

El SFLC se desarrolla en un valle longitudinal ubicado entre la sierra de La Cantera, por el este y sierra de La Invernada por el oeste, en el ámbito del cinturón plegado y cabalgado de la Precordillera Central.

La identificación de los marcadores geomorfológicos anteriormente descritos, evidencia la existencia de deformaciones activas a lo largo de todo el piedemonte occidental de la sierra de La Cantera, las cuales son observables tanto en fotografías aéreas como en el campo. Estas estructuras activas poseen una orientación preferencial N-S y afectan a todos los niveles aluviales identificados en el sector. Drenajes lineales, sinuosos, obturados, drenajes desviados, incididos, alineación de fuentes, escarpes a contrapendiente, flexurales, simples y compuestos, lagunas de falla (*sag ponds*), son características morfológicas comunes, asociadas al SFLC.

En el piedemonte occidental de la sierra de La Cantera se identificaron tres niveles cuaternarios (cuatro en el tramo central) que fueron clasificados como Q_1 , para los más jóvenes, correspondientes a los cauces actuales, y Q_2 a Q_4 para los más antiguos. La edad de los niveles fue determinada de forma preliminar por correlación con los niveles aluviales datados por Siame *et al.* (1997), y Perucca y Martos (2012) en dos valles ubicados al oeste. Las edades de los distintos niveles variarían en el área de estudio entre <5.000 años y <700.000 años.

La persistencia y continuidad de los marcadores geomorfológicos identificados a lo largo de todo el trazado de

la falla, tanto planares como lineales, aportaron valiosa información sobre las relaciones estructurales y la continuidad del sistema de falla y su actividad tectónica cuaternaria. El análisis de la red de drenaje permitió definir anomalías debidas al control que ejerce el SFLC. Al este del SFLC se pudo identificar una típica red dendrítica divergente sin evidencia de control estructural, desarrollándose en una zona de baja pendiente. La situación cambia al continuar hacia el oeste, ya que al encontrar el bloque elevado de la falla, la red posee un diseño en rastrillo, los cursos se agrupan para aumentar su caudal con el fin de vencer la estructura activa que se opone a la escorrentía natural, quedando en el bloque elevado los cauces colgados. También se aprecia una variación en la sinuosidad, con arroyos que poseen un diseño rectilíneo aguas arriba del escarpe de falla y sinuoso aguas abajo. El grado de incisión varía desde muy bajo aguas arriba a fuertemente incidido en el labio elevado de la falla.

Del análisis de las geoformas y de la datación obtenida en una de ellas, es posible determinar el control estructural que ejerce el SFLC sobre el piedemonte occidental de la sierra de la Cantera y su actividad tectónica holocena y posiblemente histórica. Esta actividad es más notable en el tramo norte de la falla, donde se encuentran cinco escarpes subparalelos en un ancho de 600 m que afectan unidades asignadas al Pleistoceno, al Holoceno y hasta a un cauce actual.

Por otro lado, en el tramo central se reconocieron las mayores alturas de escarpes, indicando el mayor desplazamiento para la falla, la cual afecta unidades del nivel Q_2 , al igual que en la porción sur (Pleistoceno medio?). En ambos tramos constituye un cabalgamiento ciego.

Se observa una gran correspondencia entre los indicadores geomorfológicos reconocidos a lo largo de todo el trazado del SFLC y las observaciones de campo con la identificación y análisis de las trincheras naturales que indican la cinemática de la falla. Todas ellas mostraron cabalgamientos de rumbo norte-sur y buzamiento promedio de 30° O. Se reconocieron además pliegues de arrastre y fallas menores de poco desplazamiento. El análisis de las trincheras permitió identificar además de la cinemática de la falla, al menos dos eventos sísmicos representados por sendas cuñas coluviales identificadas en las trincheras de los tramos Norte y Central que, sumados a la datación de un suelo afectado por la falla en el tramo Norte y al sismo instrumental ocurrido en el año 1924 de $M_s = 6,0$ permitieron inferir para esta fuente sísmogénica al menos tres sismos moderados durante el Holoceno.

Conclusiones

El Sistema de Falla La Cantera (SFLC) es una de las principales estructuras activas en el ámbito de la Precordillera Central de San Juan. Este sistema de fallamiento ha modificado el paisaje del valle de los ríos La Cantera y Gualilán, generando escarpes de falla y anomalías en la red de drenaje. La orientación promedio de las fallas es $N20^\circ E$ y buzan al oeste entre 10° y 30° en el tramo norte, aproximadamente 40° O en el tramo central y hasta 60° O en el ex-

tramo sur, con un buzamiento promedio de 30° O para todo el sistema. Se trata de cabalgamientos que deforman y desplazan todos los niveles de abanicos aluviales desde el Pleistoceno medio al Holoceno del piedemonte occidental de la sierra de La Cantera y está definida por una serie de geoformas típicas de fallamiento activo de carácter compresivo, entre las que se destacan escarpes de falla a contrapendiente, simples y compuestas, escarpes flexurales, terrazas fluviales escalonadas, lagunas de falla, fuentes alineadas, redes en rastrillo, cauces desplazados, obturados, colgados y con diferentes grados de incisión. Se presentan así, evidencias sobre la reactivación cuaternaria tardía del SFLC, un cabalgamiento de vergencia oriental, enlazando los episodios tectónicos con las modificaciones del paisaje.

A partir de los parámetros morfotectónicos y de las trincheras analizadas en este trabajo se considera al SFLC como una fuente sísmogénica potencial en la región precordillerana, cercana a la ciudad de San Juan y a presas cimentadas y a construir sobre el río San Juan.

Agradecimientos

La presente contribución fue financiada con fondos del proyecto PIP 0799-2010 (CONICET) y PICT Agencia – UNSJ 07/0013. Los autores agradecen a los evaluadores, Juan Miguel Insua Arévalo, Nemesio Heredia Carballo y al editor de la RSGE, Luis M. Nieto Albert, por los comentarios y sugerencias que permitieron mejorar sustancialmente esta contribución.

Bibliografía

- Allmendinger, R., Figueroa, D., Zinder, E., Beer, J., Mpodozis, C. e Isacks, B. L. (1990): Foreland shortening and crustal balancing in the Andes at 30° latitude. *Tectonics*, 9: 789-809.
- Alonso, J.L., Rodríguez Fernández, L.R., García-Sansegundo, J., Heredia, N., Farias, P. y Gallastegui, J. (2005): Gondwanic and Andean structure in the Argentine Central Cordillera: the Río San Juan section revisited. *6° International Symposium on Andean Geodynamics*. IRD Editions (Institut de Recherche pour le Développement), Paris:36-39.
- Audemard, F. (1999): Morpho-structural expression of active thrust fault systems in the Humid Tropical Foothills of Colombia and Venezuela. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 118: 1-18.
- Bastías, H. (1986): Fallamiento cuaternario en la región sísmo-tectónica de Precordillera: San Juan, Argentina. Tesis Doctoral Universidad Nacional de San Juan, 147 p.
- Espizúa, L. (2002): Glaciaciones Cuaternarias en el valle del Río Mendoza, Andes Argentinos. En: *Ianigla, 30 años de investigación básica y aplicada en Ciencias ambientales* (D. Trombotto y R. Villalba, eds.), Mendoza, Argentina, 111-116.
- Gallastegui, G., Cuesta, A., Rubio Ordóñez, A., Gerdes, A., Heredia, N. y Gallastegui, J. (2008): El stock granodiorítico de La Leona: magmatismo gondwánico en la Precordillera Central. *17° Congreso Geológico Argentino*, 1: 209-210.
- Gidon, M. (1987): *Les structures tectoniques*. BRGM Editions. Manuels & Methodes, 15, 193 p.
- Hull, A. (1987): Paleoseismic slip at reverse faults. En: *Directions in Paleoseismology* (A. Crone y E. Omdahl, eds.). USGS, Open File Report, 87(673): 262-270.

- INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) (1993): *La verdadera dimensión del problema sísmico en la provincia de San Juan: San Juan, Argentina*. Publicación Técnica, 18, 46 p.
- Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Damanti, J.F. y Drake, R.E. (1993): Chronology of Motion in a Complete Thrust Belt: The Precordillera, 30-31° S, Andes Mountains. *Journal of Geology*, 101: 135-156.
- Keller, E.A. y Pinter, N. (1996): *Active tectonics: Earthquakes uplift and landscape*. Prentice-Hall, New Jersey, 331 p.
- McCalpin, J.P. (2009): *Paleoseismology, 2nd Edition*. International Geophysics Series, 95, 647 p.
- Milana, J.P., Cevallos, M., Zavattieri, A., Prampano, M. y Papu, H. (1993): La secuencia terciaria de Pachaco: sedimentología, edad, correlaciones y significado paleogeográfico. *12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 1: 226-234.
- Millán, J.L. y Perucca, L.P. (2011): Análisis neotectónico del extremo norte del sobrecorrimiento La Cantera, provincia de San Juan, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18: 337-348.
- Perucca, L. y Martos, L. (2012): Geomorphology, tectonism and Quaternary landscape evolution of the central Andes of San Juan (30°S-69°W), Argentina. *Quaternary International*, 253: 80-90.
- Perucca, L., Pérez, M. y Navarro, C. (2006): Fenómenos de li-
cufacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61: 567-578.
- Perucca, L., Rothlis, M. y Vargas, H. (2014): Morphotectonic and neotectonic control on river pattern in the Sierra de la Cantera piedmont, Central Precordillera, province of San Juan, Argentina. *Geomorphology*, 204: 673-682.
- Ramos, V.A. (1999): Las provincias geológicas del territorio argentino. En *Geología Argentina* (R. Caminos, ed.). Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29(3): 41-96.
- Siame, L.L., Bournès, D.L., Sébrier, M., Bellier, O., Castano, J.C., Araujo, M., Perez, M., Raisbeck, G.M. y Yiou, F. (1997): Cosmogenic dating ranging from 20 to 700 ka of a series of alluvial fan surfaces affected by the El Tigre Fault, Argentina. *Geology*, 25: 975-978.
- Stein, R.S. y Yeats, R.S. (1989): Hidden Earthquakes. *Scientific American*, 260: 48-57.
- Von Gosen, W. (1992): Structural evolution of the Argentine Precordillera: the Río San Juan section. *Journal of Structural Geology*, 14: 643-667

MANUSCRITO RECIBIDO EL 28-10-2013

RECIBIDA LA REVISIÓN EL 29-08-2014

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 9-10-2014

