

# ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE ESCARPAS ASOCIADAS A UNA FALLA DE INTRAPLACA CON ACTIVIDAD CUATERNARIA: FALLA LAS LAGUNAS, CÓRDOBA

Diego VILLALBA<sup>1</sup> y Guillermo L. SAGRIPANTI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geología. Universidad Nacional de Río Cuarto. CP 5800 Córdoba. E-mail: diegovillalba1976@hotmail.com

## RESUMEN

El objetivo de la presente contribución es, mediante el análisis cuantitativo de la morfología de escarpas de falla desarrolladas sobre sedimentos cuaternarios, estimar las edades de las reactivaciones prehistóricas e históricas de la falla Las Lagunas.

El área de estudio se ubica al SO del departamento Río Cuarto, en el sector pedemontano de la sierra de Comechingones entre las localidades de Achiras y Sampacho, a 33° 18' S y 64° 49' O, región central de Argentina.

El análisis morfológico cuantitativo se realizó mediante la obtención de perfiles topográficos de detalle transversales a la traza de la estructura y la aplicación de curvas de regresión para determinar sus edades. Esto permitió interpretar que las evidencias de deformación mecánica, ruptura en superficie, corresponden a, al menos, cuatro fuertes terremotos asociados a esta falla con ocurrencia en los últimos 10 ka.

Con esta información se elaboró una curva de aproximación característica para rupturas en superficie, asociadas a esta falla, de edades menores o iguales a 100 años.

**Palabras clave:** Córdoba, intraplaca, morfología superficial, escarpa de falla, paleoterremoto

## ABSTRACT

*Morphological analysis of scarps associated to intraplate fault with Quaternary activity: The Las Lagunas fault, Córdoba*

The objective of this contribution is, through the quantitative analysis of the morphology of fault scarps developed on Quaternary sediments, to estimate the age of prehistoric and historic reactivations of the Las Lagunas fault.

The study area is located to the SW of Río Cuarto Department, piedmont sector of the Sierra de Comechingones between the towns of Achiras and Sampacho, 33° 18' S and 64° 49' W, central Argentina.

Quantitative morphologic analysis was performed by obtaining detailed topographic profiles transverse to the trace of the structure and application of regression curves to determine their ages. This allowed interpreting the evidence of mechanical deformation, surface rupture corresponding to at least four strong earthquakes associated with this fault that occurred during the last 10 ka.

With this data we created a characteristic approximation curve for surface ruptures related to this failure, with ages younger or equal to 100 years.

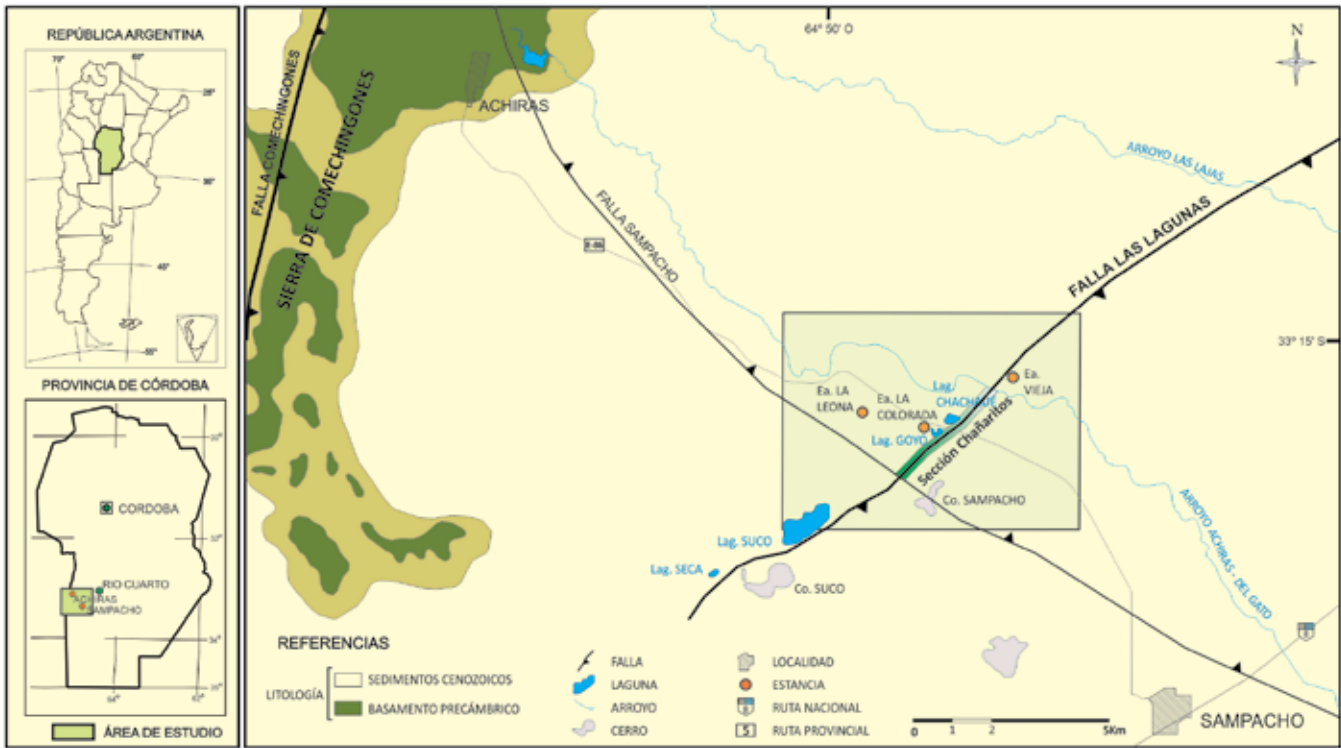
**Keywords:** Córdoba, intraplate, surface morphology, fault scarp, paleoearthquake

## INTRODUCCIÓN

Son numerosos los antecedentes que indican que el levantamiento del basamento de las Sierras Pampeanas, a la latitud 28°-33°S, está condicionado por la subducción subhorizontal de la placa tectónica de Nazca lo cual genera, en la intraplaca argentina, una importante sismicidad superficial entre la Precordillera y las Sierras Pampeanas (Pilger 1981, Jordan *et al.* 1983, Jordan y Almendinger 1986, Smalley *et al.* 1993, Costa y Vita Finzi 1996, Ramos 1999, Ramos *et al.* 2002). En la re-

gión que comprende las Sierras Pampeanas de Córdoba, asociados a este marco tectónico, se reconocen importantes rasgos de actividad neotectónica, como morfologías superficiales, deformaciones co-sísmicas en sedimentos cuaternarios y evidencias de terremotos prehistóricos. Estas manifestaciones hacen suponer que la actividad tectónica neógena en esta región ha sido intensa (Schlagintweit 1954, Wagner-Manslau 1988, Costa *et al.* 2001, Massabie *et al.* 2006, Sagripanti 2006, Sagripanti y Villalba 2009, Seitz 2009, Gallo 2011, Sagripanti *et al.* 2011, Villalba 2011).

En las investigaciones neotectónicas se considera de fundamental importancia que los estudios paleosismológicos realizados para obtener información acerca de la sismicidad prehistórica de una región, mediante la reconstrucción de los fuertes terremotos prehistóricos que dejaron huellas apreciables en los materiales del Cuaternario, sean complementados con estudios de geomorfología tectónica para estimar edades de ocurrencia (Audemard y Singer 1996). La información obtenida por medio de estas investigaciones permite a la tectónica activa y a la paleosismo-



**Figura 1:** Mapa de ubicación del área de estudio, de la traza de la falla Las Lagunas y Sección Chañaritos.

logía definir número de paleoterremotos, paleomagnitud, recurrencia, longitud de ruptura, desplazamiento por evento y tasa de desplazamiento para estimar el potencial sísmico de una falla activa.

Si bien las zonas con mayor deformación y actividad sísmica son las de bordes de placas tectónicas y por lo tanto las más estudiadas, en la actualidad existen numerosos antecedentes de estudios neotectónicos en fallas de intraplaca, entre los cuales se pueden citar importantes aportes de trabajos donde se han analizado las deformaciones resultantes de eventos sísmicos prehistóricos con el auxilio de la paleosismología (Pantosti y Yeats 1993, Stewart, 1993, Mc Calpin 1996, Crone *et al.* 1997, Vanneste *et al.* 1999, Philip *et al.* 2001), y otros que han sido complementados aplicando aproximaciones morfométricas de las escarpas resultantes (Bucknam y Anderson 1979, Keller y Rockwell 1984, Menges 1990); algunos antecedentes de estudios morfométricos en escarpas desarrolladas en sedimentos sueltos, en fallas ubicadas en la región SO de Córdoba corresponden a los realizados por Sagripanti *et al.* 2003, Sagripanti 2006 y, Villalba 2011.

Los estudios paleosimológicos se realizan relevando e interpretando estructuras deformacionales fósiles, generadas por fuertes terremotos prehistóricos, mediante la excavación y descripción de trincheras, que se complementan con un análisis cuantitativo de la morfología de las escarpas de fallas a través del relevamiento de perfiles topográficos de detalle, transversales a la estructura.

El análisis cuantitativo de la morfología de las escarpas de falla se considera una potente herramienta para estimar la edad de reactivación de una estructura con actividad cuaternaria, basado en el principio de que el volumen del material removido en la modelación del relieve, por la actuación de los procesos superficiales, es una función relacionada directamente con el tiempo. La erosión y atenuación de las escarpas están controladas por el clima, cobertura vegetal, uso del suelo, ángulo de talud y propiedades físicas intrínsecas de los materiales fallados.

Las variaciones de las diferentes partes que componen una escarpa como ángulo máximo de talud y altura, constituyen la información cuantitativa de base para

definir curvas patrón que permiten estimar la edad de las mismas. El conocimiento de la edad de sísmos prehistóricos que han generado escarpas, permite estimar y reconstruir la sismicidad promedio regional, para periodos de miles de años (Wallace 1977, Bucknam y Anderson 1979).

Los perfiles morfométricos levantados sobre una escarpa son de fundamental importancia para: (a) describir las características morfológicas de la geoforma, (b) cuantificar los elementos de pendiente que la componen, (c) obtener los parámetros básicos para datación morfológica, (d) identificar eventos de fallamiento superficial de diferentes edades relativas preservados en el registro geomorfológico y (e) reconstruir geométricamente la magnitud del desplazamiento vertical cosísmico asociado a fuertes terremotos históricos y prehistóricos (Wallace 1977, 1986, Bucknam y Anderson 1979, Mayer 1984).

Los aspectos más relevantes de esta metodología han sido presentados por Wallace (1977), Machette (1989), Mc Calpin (1996) y Crone *et al.* (1997) entre otros, y comprenden aproximaciones semicuantitativas, que fueron también aplicadas por

Menges (1990), Sagripanti *et al.* (2003), Sagripanti (2006) y Villalba (2011), para la estimación de la edad de escarpas de fallas cuaternarias.

En la intraplaca argentina a los 33°S de latitud, en las Sierras Pampeanas de Córdoba, en proximidades de la localidad de Sampacho, se ubica la falla Las Lagunas con probada actividad cuaternaria que posee antecedentes de fuertes terremotos históricos y prehistóricos que han alcanzado  $M \geq 6,0$ . La expresión morfológica superficial de esta estructura, única en la región, está caracterizada por una escarpa principal y pequeñas escarpas asociadas, formadas en sedimentos cuaternarios, que persisten aún frente a la importante actividad antrópica y a la erosión eólica y fluvial (Mingorance 1991, Sagripanti *et al.* 2003, Sagripanti 2006, Sagripanti y Villalba 2006, 2009, Seitz 2009, Sagripanti *et al.* 2011, Villalba 2011).

Es de destacar que, a pesar de que la zona ha sido epicentro de dos de los terremotos más destructores ocurridos dentro de la Zona 1 de Peligrosidad Reducida de Argentina y de poseer antecedentes de terremotos prehistóricos que habrían alcanzado una magnitud (Richter)  $M 7,0$ , el potencial sismogénico de la falla actualmente es sólo parcialmente conocido, impidiendo de esta manera la interpretación adecuada del peligro sísmico asociado a la misma.

Además, debido a que en las regiones de intraplaca, los fuertes terremotos poseen períodos de recurrencia prolongados se considera que es necesario extender el registro de la sismicidad hacia atrás en el tiempo para avanzar en el conocimiento del potencial sismogénico de una falla, recurriendo a investigaciones paleosismológicas complementadas con estudios cuantitativos de la morfología de las escarpas de falla. Es oportuno resaltar que hasta el presente son escasos los antecedentes de este tipo de análisis de detalle en estructuras de la región sur de Córdoba.

Sobre la base de lo anteriormente planteado y para avanzar en el conocimiento del potencial sismogénico de la falla Las Lagunas, se considera necesario realizar estudios cuantitativos de la morfología de

su escarpa de falla que sean de aporte a la reconstrucción de los movimientos prehistóricos y complementen los estudios paleosismológicos realizados anteriormente. Se considera que esta información posibilitará una estimación más concreta del peligro sísmico asociado a la falla Las Lagunas.

Los objetivos de la presente contribución son, por medio de investigaciones de geomorfología tectónica, obtener información que permita, mediante el análisis cuantitativo de la morfología de escarpas de falla, estimar las edades de las reactivaciones prehistóricas e históricas de la falla Las Lagunas y avanzar en el conocimiento del registro paleosismológico y del comportamiento de fallas activas en ambientes de intraplaca.

El área de estudio se ubica en la sección Chañaritos de la falla Las Lagunas, entre las localidades de Achiras y Sampacho, a una altura de 625 m.s.n.m. en el sector pedemontano de la sierra de Comechingones, sur de la provincia de Córdoba (Fig. 1). El clima de la región es mesotermal con un régimen hídrico que varía desde subhúmedo húmedo a subhúmedo seco, con episodios de fuertes vientos durante todas las estaciones. Las temperaturas medias son del orden de 16,5° C, registrándose la media máxima de 23° C en el mes de enero y la mínima de 9° C en el mes de julio. El 80% de las lluvias se concentra en las estaciones de primavera y verano con inviernos muy secos (Cabrera 2010).

## MARCO GEOLÓGICO Y SISMICIDAD

### Geología Local

La zona de estudio se ubica en la región de intraplaca argentina, dentro de un contexto tectónico de subducción subhorizontal, en el límite transicional entre las provincias geológicas de Sierras Pampeanas y Llanura Chaco-Pampeana. Presenta cerros relictos aislados de litología grano-pegmatítica de edad ordovícica como el Cerro Sampacho y el Áspero, y formados por areniscas pérmicas como el Cerro Suco, los cuales sobresalen en un relieve ondulado característico de una zona

pedemontana distal. Esta última está conformada predominantemente por sedimentos cenozoicos de origen eólico, fluvio eólico y lagunar compuestas por arenas, limos y arcillas, que integran las siguientes unidades estratigráficas descritas y fechadas por Cantú (1992) y Cantú *et al.* (2006).

La Formación Alpa Corral, está formada por arenas finas con gravas dispersas, gravas finas y gruesas intercaladas con arenas medias a gruesas con estructura en artesa. Su origen es fluvial y su edad está asignada al límite del Plio-Pleistoceno.

La Formación Pampiano está subdividida en dos miembros: uno compuesto por sedimentos limo arenosos (loess) de color pardo rojizo a pardo amarillento, de origen fluvial y palustre; el otro miembro, de origen eólico, está formado por materiales limosos y limo arenosos muy finos, de color pardo rojizo. La edad asignada para estos sedimentos es Pleistoceno tardío. La Formación Chocancharava está constituida por las distintas facies de un importante ciclo fluvial de canal, de aguas tranquilas, de canal abandonado y de llanura de inundación o de lagunas con diatomeas. La edad asignada es del Pleistoceno superior.

La Formación Laguna Oscura, está formada por sedimentos eólicos, arenosos muy finos a limosos. La edad determinada, mediante luminiscencia por estimulación óptica, para esta formación es holocena, entre 6.000-4.000 a AP.

Sobreyace a estas formaciones un suelo de pobre desarrollo, en el cual se destaca un horizonte Ap debido a su uso agrícola.

### Hidrografía

La hidrografía regional está caracterizada por cursos permanentes, no permanentes y lagunas, siendo el curso permanente principal del sector el arroyo Achiras-del Gato y la dirección de escurrimiento superficial y subterráneo regional hacia el SE. Una característica hidrográfica local es la presencia de lagunas alineadas en cadena, ubicadas en la base de la escarpa de la falla Las Lagunas, que ejerce un control estructural al escurrimiento superficial y subterráneo. Entre ellas se destacan las la-

gunas de Suco, Chachaué y Goyo.

### Tectónica cuaternaria

Las deformaciones cuaternarias reconocidas en las Sierras Pampeanas expresan el estilo de la tectónica andina regional. Este consiste en fallas inversas lítricas que normalmente inclinan al E y limitan bloques elevados y basculados del basamento cristalino. Estas estructuras, que se manifiestan como corrimientos del basamento cristalino afectando también a los sedimentos cuaternarios, están asociadas a las zonas pedemontanas de las sierras de Córdoba, entre ellas a la sierra de Comechingones (Costa 1999, 2004).

Las estructuras presentes en el sector suroccidental de las últimas estribaciones de la sierra de Comechingones presentan las características definidas para las Sierras Pampeanas de Córdoba, de bloques diferencialmente ascendidos o descendidos y basculados, limitados por estructuras de orientación meridional, generando una morfología escalonada y ondulada cuya expresión disminuye hacia el SE (Sagripani 2006). Así también, la deformación frágil de este sector está expresada por lineamientos y fallas que poseen una orientación preferencial NO y NE. Algunas de estas estructuras presentan evidencias de actividad neotectónica, entre ellas la falla Las Lagunas.

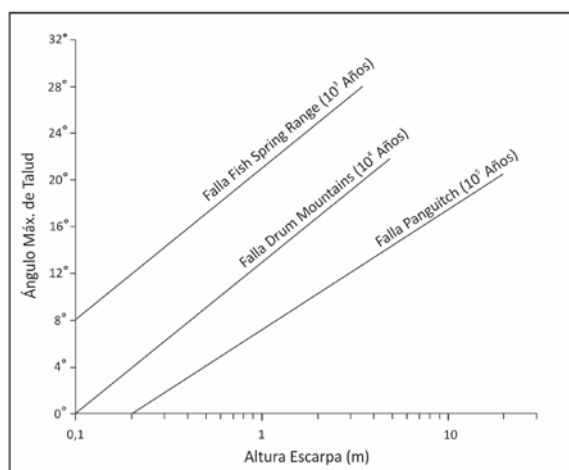
Esta estructura es de movimiento inverso, plano buzante hacia el SE ( $35^{\circ}$ - $40^{\circ}$ ) y rumbo aproximado  $050^{\circ}$ . Se considera que posee rasgos morfológicos relevantes a lo largo de su traza, de aproximadamente 70 km de longitud (Seitz 2009). La expresión morfológica de esta falla es una escarpa principal, con pequeñas escarpas asociadas, que enfrenta al NO y se desarrolla en materiales no consolidados loésicos de edades holocenas. La altura de la misma, a lo largo de sus distintas secciones, varía entre 7,5 y 12 m.

### Sismicidad local

El área de estudio se encuentra en una región que posee una actividad sísmica importante tanto prehistórica, como histórica e instrumental. Estudios paleosismológicos indican que en esta área



**Figura 2:** Vista aérea oblicua a baja altura y con bajo ángulo de incidencia solar de la sección Chañaritos. Las flechas indican la ubicación de la morfología superficial de la falla y las líneas blancas resaltan la escarpa y pequeñas escarpas.



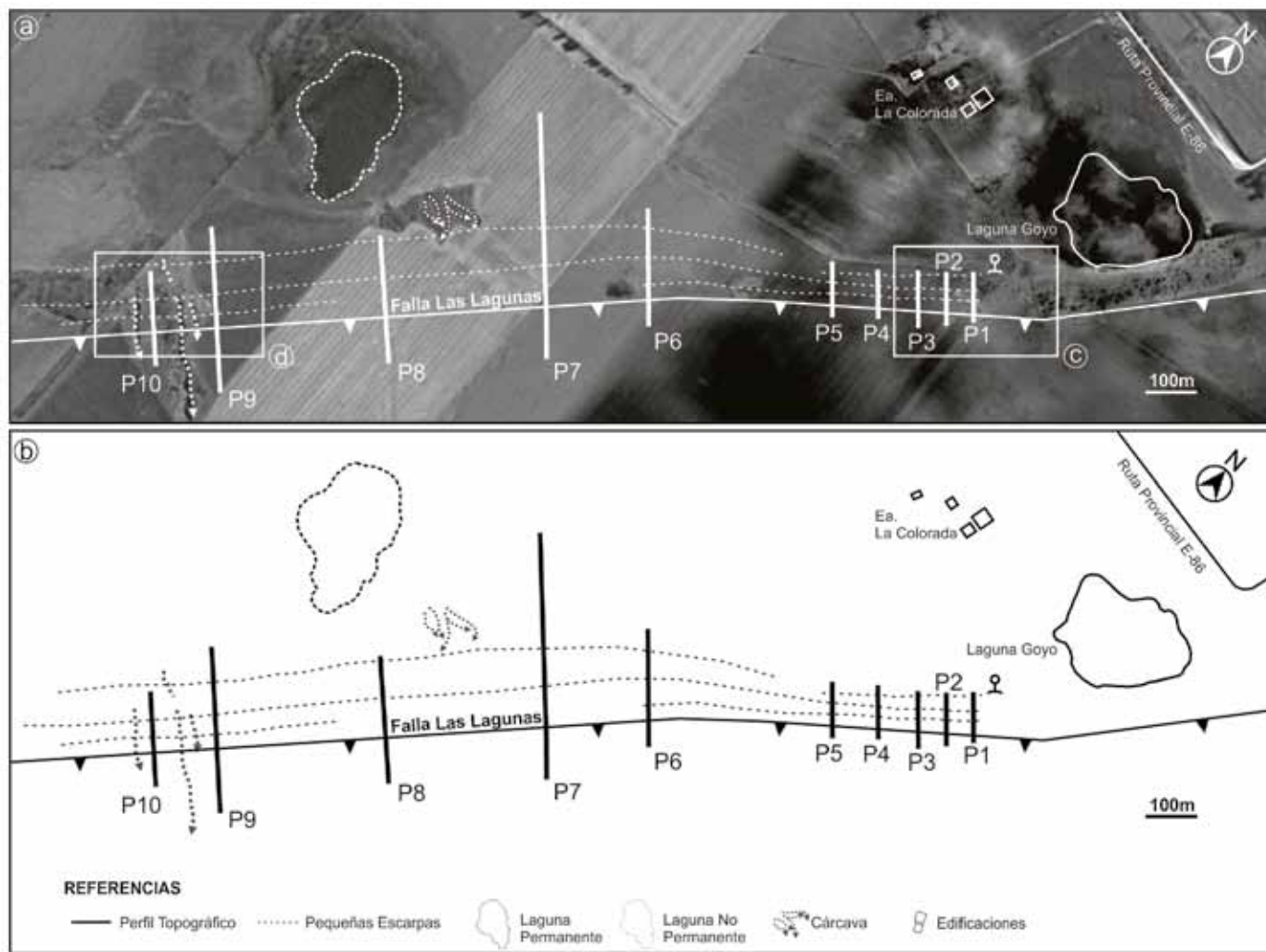
**Figura 3:** Gráfico de doble entrada con curvas de regresión para estimar edades de escarpas propuestas por el método de Bucknam y Anderson (1979).

han ocurrido numerosos paleoterremotos fuertes, que habrían alcanzado magnitudes de Ms 7,0 durante el Cuaternario, generando rupturas superficiales (Sagripani 2006, Sagripani y Villalba 2009, 2011). Es de destacar como un importante antecedente histórico el que generó una crisis sísmica, con epicentro en la intraplaca argentina, en la localidad de Sampacho en el año 1934.

Esta crisis estuvo conformada por la ocurrencia de dos terremotos destructores espaciados por un intervalo de tres horas, el primero de M 5,5 y el principal de M 6,0,

con una intensidad de VIII-IX Mercalli Modificada (MM), denominado “Gran Terremoto de Sampacho”, que es considerado de los más fuertes registrados dentro de la Zona 1, de Peligrosidad Reducida de Argentina (Sagripani 2006).

La región es frecuente epicentro de sismicidad moderada-leve y superficial, concentrada principalmente entre las localidades de Achiras y Sampacho, de acuerdo a los reportes del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). Si bien normalmente los sismos son de  $M \leq 3,0$  en algunos casos han alcanzado la M 3,7.



**Figura 4:** a) Ventana de una foto aérea de la sección Chañaritos; b) *Sketch* donde se presenta la ubicación de las escarpas y la distribución de los perfiles topográficos relevado; c) Ubicación de la foto oblicua Figura 7b; d) Ubicación de la foto oblicua Figura 7c.

Se han relevado hasta el año 2012 parámetros macrosísmicos correspondientes a más de 175 microsismos.

## METODOLOGÍA

Se considera que la falla Las Lagunas es, entre las estructuras reconocidas con actividad cuaternaria, la que ofrece las características morfológicas superficiales, litológicas y estructurales, más apropiadas para ser analizada desde una perspectiva de la geomorfología tectónica y paleosismología. Su expresión superficial (escarpa principal y pequeñas escarpas) son ejemplos de evidencias de deformaciones cósmicas cuaternarias. Esta falla está formada por 4 secciones, entre ellas la denominada Chañaritos, que se caracteri-

za por poseer la mayor tasa de movimiento de toda la estructura (Sagripanti, 2006, Sagripanti y Villalba 2009, Sagripanti *et al.* 2011) y por presentar sectores en donde la escarpa está sometida a intervención antrópica, como manejo agrícola con procesos de erosión más activos (escarpa no protegida) y sectores sin actividad antrópica (escarpa protegida). Sobre la base de la presencia de estas características casi únicas en el sector, se escogió a esta sección para desarrollar las investigaciones propuestas en esta contribución (Fig. 2). El análisis morfométrico de las escarpas se realizó en tres etapas, dos de gabinete y una de campo. En la primera etapa de gabinete se comenzó con la interpretación y análisis de fotografías aéreas verticales y oblicuas tomadas a baja altura y con ba-

jo ángulo de incidencia solar para delimitar el sector de la traza de la falla a relevar, definir el espaciamiento y la cantidad de perfiles topográficos de detalle a realizar. En la etapa de campo se realizó el levantamiento de los perfiles, perpendiculares a la traza de la falla, para lo cual se utilizó una estación total electrónica marca Sokkia, modelo SET 610, de señal LED infrarrojo.

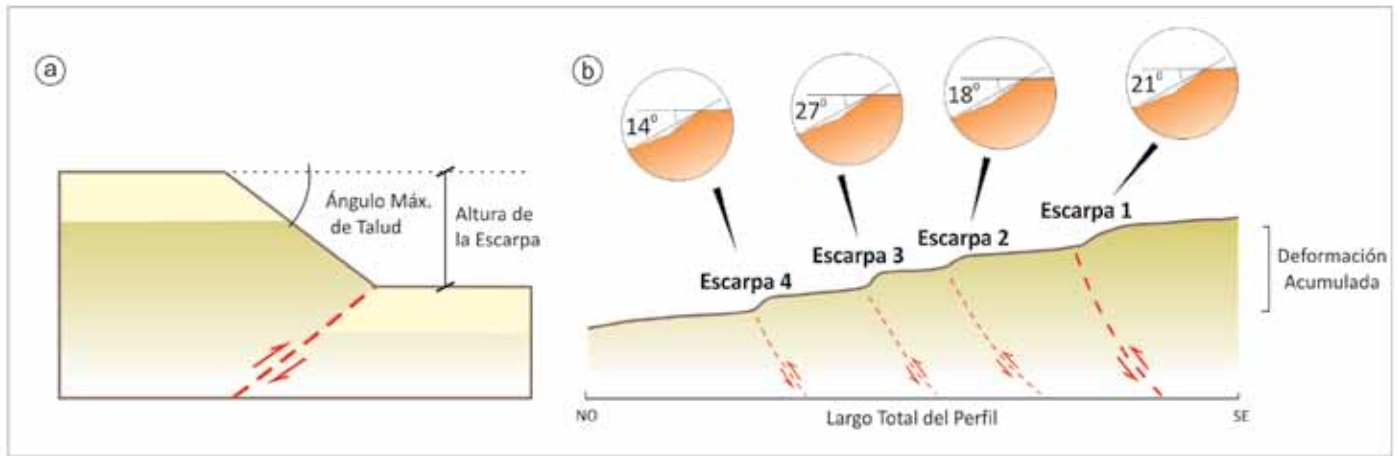
La tercera etapa consistió en el análisis cuantitativo realizado siguiendo la metodología desarrollada por Wallace (1977) ampliada y mejorada por Bucknam y Anderson (1979). Ésta consiste en cuantificar parámetros de la morfología de las escarpas (principalmente su altura y ángulo máximo de talud), ingresarlos en ábacos de doble entrada (curvas de regresión) y

**CUADRO 1:** Planilla de síntesis con los datos de la geometría de las escarpas utilizados en el análisis cuantitativo, la deformación acumulada y las edades interpretadas.

	Deformación Acumulada (m)	Longitud Total (m)	ESCARPAS												
			ESCARPA 1			ESCARPA 2			ESCARPA 3			ESCARPA 4			
			TALUD	ALTURA (cm)	EDAD (años)	TALUD	ALTURA (cm)	EDAD (años)	TALUD	ALTURA (cm)	EDAD (años)	TALUD	ALTURA (cm)	EDAD (años)	
PERFILES	PERFIL 1	1,65	135	11°	69	10 <sup>4</sup>	12°	42	10 <sup>3</sup>	23°	34	10 <sup>1</sup>	6°	20	10 <sup>4</sup>
	PERFIL 2	1,65	118	10°	60	10 <sup>4</sup>	11°	50	10 <sup>3</sup>	11°	15	10 <sup>3</sup>	8°	40	10 <sup>3</sup>
	PERFIL 3	1,66	121	7°	45	10 <sup>4</sup>	10°	49	10 <sup>4</sup>	15°	27	10 <sup>3</sup>	10°	45	10 <sup>4</sup>
	PERFIL 4	1,05	104	9°	36	10 <sup>4</sup>	6°	21	10 <sup>4</sup>	6°	25	10 <sup>4</sup>	8°	23	10 <sup>4</sup>
	PERFIL 5	1,66	100	7°	40	10 <sup>4</sup>	6°	29	10 <sup>4</sup>	9°	49	10 <sup>4</sup>	9°	48	10 <sup>4</sup>
	PERFIL 6	1,57	212	9°	36	10 <sup>4</sup>	9°	56	10 <sup>4</sup>	6°	55	10 <sup>5</sup>	5°	10	10 <sup>4</sup>
	PERFIL 7	1,06	215	7°	42	10 <sup>4</sup>	—	—	—	9°	34	10 <sup>4</sup>	8°	30	10 <sup>4</sup>
	PERFIL 8	0,65	230	8°	37	10 <sup>4</sup>	—	—	—	7°	28	10 <sup>4</sup>	—	—	—
	PERFIL 9	1,30	280	9°	40	10 <sup>4</sup>	8°	40	10 <sup>4</sup>	16°	15	10 <sup>1</sup>	12°	35	10 <sup>3</sup>
	PERFIL 10	1,40	120	21°	50	10 <sup>3</sup>	18°	20	10 <sup>1</sup>	27°	40	10 <sup>1</sup>	14°	30	10 <sup>3</sup>

**Talud:** Ángulo Máximo de Talud de la Escarpa.

**Altura:** Diferencia de Cota Topográfica entre Inicio y final del Talud de la Escarpa.



**Figura 5:** a) Esquema simplificado de los parámetros considerados de la escarpa; b) Perfil de síntesis con la ubicación de las escarpas.

así estimar su edad (Fig. 3).

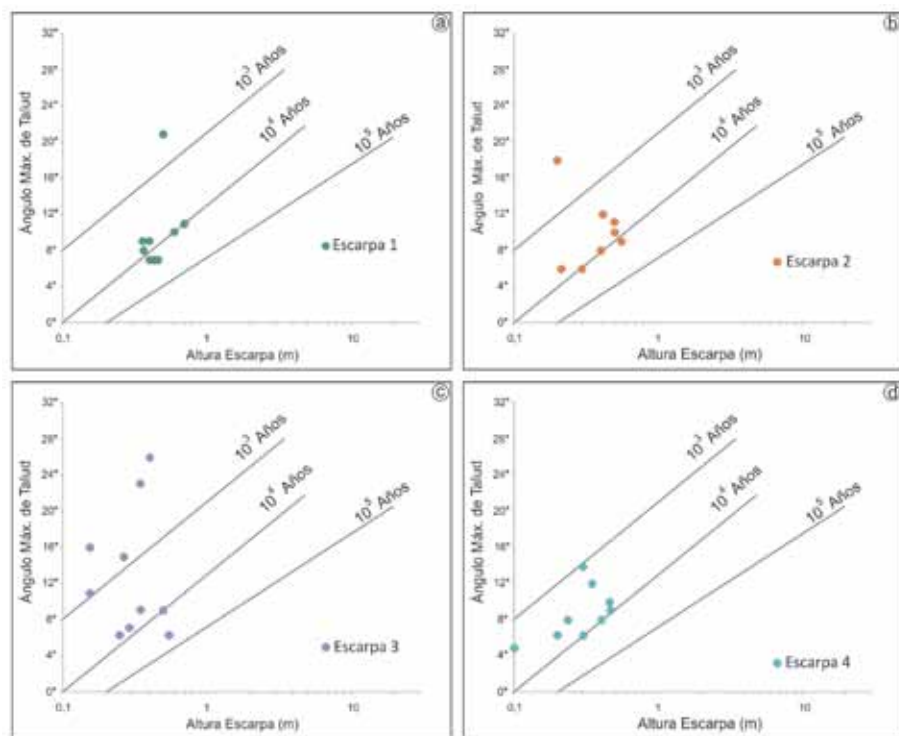
La metodología desarrollada por Bucknam y Anderson (1979) provee bases más cuantitativas para la evaluación de la edad de las escarpas de fallas a partir de las mediciones de numerosos perfiles topográficos realizados en escarpas de fallas cuaternarias. Surgen de los datos obtenidos, curvas de regresión que sugieren una edad determinada de reactivación a partir de que el ángulo máximo del talud de la escarpa es proporcional al logaritmo de la altura.

El desarrollo de esta metodología ha si-

do en un ambiente de características tectónicas, sedimentológicas y climáticas diferentes al sitio del presente estudio, ya que las escarpas estudiadas corresponden a fallas normales donde las superficies de los sedimentos expuestos (gravas y materiales aluviales no consolidados) presentan una baja cobertura de matas y arbustos, y el clima es semiárido. Este ambiente se ubica en la región occidental del estado de Utah y las fallas estudiadas fueron Fish Springs Range, Drum Mountains y Panguitch, cuyas edades estimadas son 10<sup>3</sup>, 10<sup>4</sup> y 10<sup>5</sup> años respectivamente.

Estos autores consideran que las relaciones entre la altura de la escarpa y el ángulo máximo del talud es una importante herramienta para la estimación de la edad de escarpas. Por otra parte, como no es clara la influencia del clima y la litología en la modificación de las escarpas, sugieren que la utilización de estas curvas de regresión, en ambientes diferentes a los de donde fueron definidas, debe realizarse con prudencia.

Si bien existe una diferencia entre los ambientes donde se desarrolló la metodología y el de la zona de estudio, y atendiendo



**Figura 6:** Gráficos de edades estimadas: a) Escarpa 1; b) Escarpa 2; c) Escarpa 3; d) Escarpa 4.

a las consideraciones anteriores, se decidió aplicar el método para hacer una calibración de las curvas de regresión y una aproximación de las edades de las escarpas desarrolladas en ambientes sedimentarios de intraplaca.

## ANÁLISIS MORFOMÉTRICO CUANTITATIVO

En este análisis se realizó el relevamiento de perfiles topográficos de detalle, la estimación de edades de reactivación de la falla y una calibración de la edad de morfologías que corresponden a rupturas superficiales de alrededor de 100 años.

### Relevamiento de perfiles topográficos de detalle

En la determinación de la ubicación de cada uno de los perfiles topográficos, transversales a la escarpa de falla, se han tenido las siguientes consideraciones: definir una equidistancia apropiada entre perfiles que asegure cubrir la mayor superficie de la sección de la falla elegida, y evitar la presencia de toda modificación del relieve que no tenga carácter tectónico, como las

producidas por la intervención antrópica y erosión natural, entre éstas, canales de escurrimiento paralelos a la base de la escarpa, cárcavas, surcos de arroyada difusos, etc. (Fig. 4).

Se relevaron 10 perfiles topográficos de detalle que poseen un azimut de  $320^\circ$ , aproximadamente perpendiculares a la escarpa y pequeñas escarpas de la falla. La equidistancia entre los puntos relevados en cada perfil es de 20 cm, en los quiebres de pendiente menor de 15 cm, y entre los perfiles de aproximadamente 200 m. La longitud de los mismos varía entre 100 y 280 m.

En el relevamiento de campo se obtuvieron más de 2.500 puntos acotados, considerados los datos de base, a los cuales posteriormente se procesó en forma gráfica y analítica.

En el análisis geométrico de los perfiles topográficos se identificó el ángulo máximo de talud y la altura de la escarpa (Fig. 5a), parámetros considerados en el posterior análisis cuantitativo siguiendo el criterio de Bucknam y Anderson (1979).

Este análisis permitió detectar y definir, cuatro escarpas que fueron denominadas,

de mayor a menor cota dentro del perfil, como escarpa 1, 2, 3 y 4. Un perfil de síntesis donde se indica la distribución de las escarpas y algunas de sus características es presentado en la Figura 5b.

### Estimación de edades de reactivación de la falla

La estimación de las edades de reactivación de la falla Las Lagunas, con rupturas cosísmicas asociadas, se realizó considerando dos de los parámetros geométricos definidos de la expresión morfológica de una escarpa: el ángulo máximo de talud y la altura de la escarpa. Los valores de estos parámetros son ingresados en un gráfico de doble entrada correspondiente a las curvas patrón definidas por Bucknam y Anderson (1979).

El análisis se realizó considerando por separado a cada una de las escarpas identificadas (Fig. 6). De la distribución de los datos obtenidos, se interpretó lo siguiente:

- 1.- La escarpa 1 posee una edad de alrededor de  $10^4$  años. El punto en el gráfico que indica una edad aproximada menor a 103 años corresponde a un dato de la escarpa en zona protegida (Fig. 6a).
- 2.- La escarpa 2 posee una edad de entre  $10^3$  y  $10^4$  años (Fig. 6b). El punto en el gráfico que indica una edad aproximada menor a 103 años corresponde a un dato de la escarpa en zona protegida.
- 3.- La escarpa 3 posee edades de  $10^3$  y de  $10^2$  años. Se supone que esta diferencia o variación en la edad que se ha estimado está condicionada por la ubicación de la escarpa en sectores protegidos y no protegidos (Fig. 6c).
- 4.- La escarpa 4 presenta una edad entre  $10^3$  y  $10^4$  años (Fig. 6d).

Los datos de la geometría de las escarpas utilizados en el análisis cuantitativo, la deformación acumulada y las edades interpretadas se presentan en una planilla de síntesis (Cuadro 1).

Con el fin de obtener mayor aproximación a la edad real, entre todos los valores de edad obtenidos para una misma escarpa se consideró el más joven. Esta consideración se basa en que, en igualdad de condiciones de exposición, la escarpa de menor edad es la que posee la geometría con mayor semejanza a la escarpa primitiva.

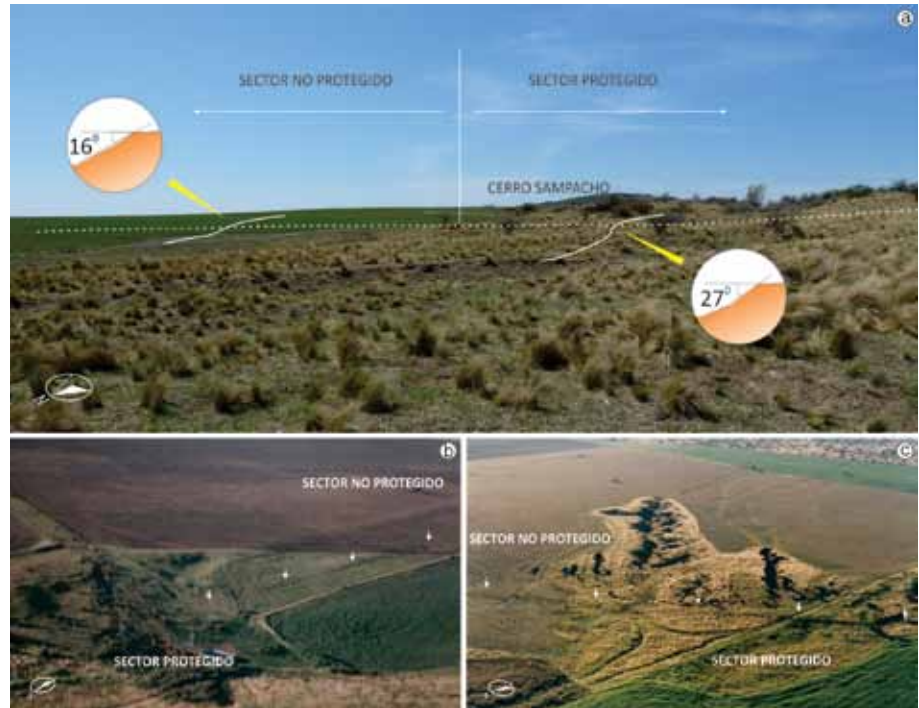
A partir de la deformación superficial relevada en la falla Las Lagunas y de los resultados del análisis cuantitativo se interpretó que, al menos, cuatro paleoterremotos generaron rupturas en superficie, durante el Holoceno lo cual permite clasificar a la escarpa como múltiple eventos. Se establece esta categoría cuando una escarpa posee múltiples cambios de pendiente originados, cada uno de ellos, por un evento de ruptura individual (Mc Calpin 1996). Otra observación que se considera relevante en este análisis es el diferente valor que presenta el ángulo máximo del talud para una misma pequeña escarpa cuando atraviesa un sector protegido y otro no protegido, siendo de  $27^\circ$  en el primer caso y de  $16^\circ$  para el segundo, lo que está indicando una disminución de un 40% (Fig. 7a).

#### Aproximación de la edad de rupturas superficiales inferior a 102 años

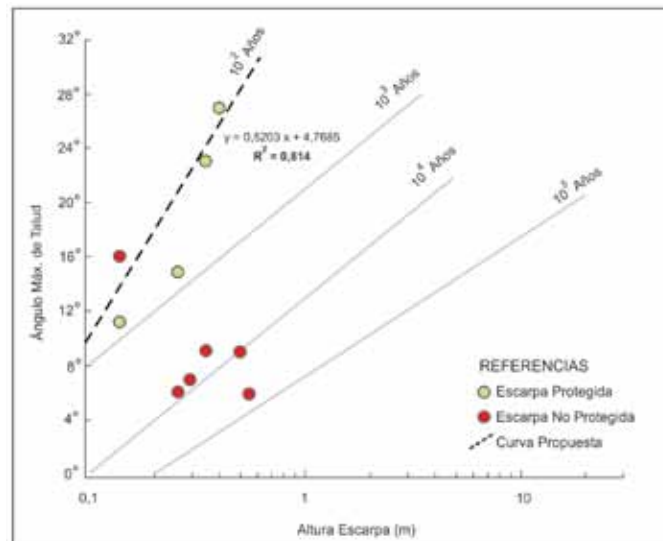
Si bien no es clara la influencia de los factores como el clima y la litología en el modelado de las escarpas, se ha constatado, en las morfologías en estudio, que la intervención antrópica (actividad agrícola) y la cubierta vegetal tienen incidencia tanto en su evolución, cuando la escarpa se desarrolla en sedimentos loessoides, como así también en la estimación de sus edades.

Se ha comprobado en este trabajo que una misma escarpa que atraviesa sectores donde los sedimentos superficiales y la cobertura vegetal original han sido modificados (sector no protegido) y sectores protegidos, presenta, entre éstos, una variación significativa del valor del ángulo máximo del talud. Es por ello que se realizó un análisis de mayor detalle de las escarpas que atraviesan sectores diferentes, para conocer con mayor certeza cómo evoluciona la morfología superficial de una escarpa bajo estas dos situaciones (Fig. 7b y c).

Sobre la base de lo anteriormente planteado, se decidió analizar la escarpa 3 ya que corresponde posiblemente a la ruptura cosísmica, en la sección Chañaritos, de la falla Las Lagunas durante el Gran Terremoto de Sampacho de M 6,0 del año 1934, 78 años desde su último evento (*elapsed ti-*



**Figura 7:** a) Vista panorámica de la escarpa 3 atravesando un sector no protegido y uno protegido del extremo occidental de la Sección Chañaritos; b) Vista aérea oblicua de la escarpa en la Ea. La Colorada; c) Vista aérea oblicua de la escarpa en la Ea. La Leona.



**Figura 8:** Gráfico de aproximación de la edad de la escarpa 3 ubicada en sectores protegidos y no protegidos y curva característica para ruptura de edad menor a  $10^2$  años.

me) sísmico importante, dado que es sobre la que se tiene mayor certeza sobre su edad (Sagripanti, 2006, Sagripanti *et al.* 2011). Se realizó el tratamiento de los datos correspondientes a esta escarpa (Fig. 8) aplicando el método de Bucknam y Anderson (1979).

Del análisis de la Figura 8 se desprenden dos interpretaciones consideradas relevantes. Permite visualizar que las edades,

a ambos lados del límite de uso de suelos, presentan una diferencia importante. En el caso del sector protegido la edad de la escarpa es de alrededor de  $10^2$  años, mientras que para el sector no protegido la edad es mayor a  $10^3$  años. Por otra parte, la distribución de los datos en el gráfico permite definir una curva de aproximación característica para rupturas de  $10^2$  años, cuyo coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es



igual a 0,814, generadas sobre materiales loésicos presentes en el área de estudio. Se considera a estos resultados relevantes porque permiten hacer, por primera vez, una aproximación a la estimación de las edades de escarpas desarrolladas sobre sedimentos cuaternarios, tanto sometidas a intervención antrópica como en su estado natural. Así también estos podrían ser extrapolados para estimar edades de reactivación de otras fallas de la región que aún no han sido valoradas.

## CONCLUSIONES

Los resultados del análisis cuantitativo de la morfología de las escarpas permiten concluir que las evidencias de deformación mecánica relevadas y analizadas corresponden, al menos a tres fuertes terremotos prehistóricos y uno histórico, asociados a la falla Las Lagunas, que generaron rupturas en superficie.

Se interpretó que los numerosos cambios de pendiente de las escarpas analizadas, representan rupturas superficiales que corresponden a distintos paleoterremotos. Por lo tanto, se concluye que la falla posee una escarpa multieventos.

Las edades estimadas para las escarpas, permiten concluir que la estructura ha tenido una importante actividad tectónica desde hace al menos 10.000 años hasta la actualidad, corroborando la actividad holocena de la falla.

La preservación de la expresión en superficie de las escarpas de la falla Las Lagunas, a pesar de la intervención antrópica (laboreo agrícola), la erosión hídrica y eólica, corresponde posiblemente al aporte energético inducido por la actividad tectónica cuaternaria (desplazamientos, sismicidad, etc.) que genera el constante rejuvenecimiento de las mismas. Por lo tanto, se concluye que la falla ejerce un control activo sobre las escarpas, indicando una tasa de levantamiento mayor que la de erosión.

A partir del análisis de la pequeña escarpa 3 atribuida al Gran Terremoto de Sampacho, en sectores protegidos y no protegidos, se concluye que una escarpa que evoluciona en un ambiente geológico y

climático como el de estudio, puede disminuir el ángulo máximo del talud en aproximadamente un 40% en 78 años. Esta reducción se traduce en una sobreestimación de la edad real de la escarpa en más de 10.000 años.

Los resultados obtenidos en la presente investigación se consideran un aporte para comprender mejor cómo evoluciona el modelado de las morfologías superficiales, de las rupturas cosísmicas, generadas en sedimentos cuaternarios no consolidados y un avance en el conocimiento del potencial sismogénico de una falla activa ubicada en una zona de intraplaca.

Finalmente, se considera que la curva de aproximación definida para una ruptura superficial asociada a un fuerte terremoto vinculado a la falla Las Lagunas de edad menor o igual a 100 años, será útil para futuros estudios donde se procure definir edades de ruptura para escarpas ubicadas en la intraplaca, bajo similares condiciones (tectónicas, litológicas, climatológicas) a las de la presente investigación.

## AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Laura Perucca y al evaluador anónimo, en instancias del arbitraje para el V Congreso de Cuaternario y Geomorfología, y a los Drs. Franck Audemard, Marcelo Zárate y Analía Casa por la lectura crítica del manuscrito y sugerencias que han permitido mejorar significativamente este trabajo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Audemard, F. A. y Singer, A. 1996. Active fault recognition in northwestern Venezuela and its seismogenic characterization: Neotectonic and paleoseismic approach. *Revista Geofísica Internacional* 35: 245-255.
- Bucknam, R. y Anderson, R. 1979. Estimation of fault-scarp ages from a scarp-height-slope-angle relationship. *Geology* 7: 11-14.
- Cantú, M. P. 1992. El Holoceno en la provincia de Córdoba. *Holoceno de la República Argentina*. *Cadínqua* 1: 1-16.
- Cantú, M., Schiavo H., Becker A., Zhou L. y Grumelli, M. 2006. Pleistoceno superior tardío-Holoceno de la cuenca media del arroyo

- Santa Catalina, prov. de Córdoba, Argentina. 3° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas 2: 777-786. Córdoba
- Cabrera, A. 2010. Evolución hidrogeoquímica e isótopos ambientales del sistema acuífero asociado a los ambientes morfotectónicos de la falla regional Tigre Muerto. Córdoba. Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 353 p., Río Cuarto.
- Costa, C. H. 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino, tectónica cuaternaria en las Sierras Pampeanas. Instituto de Geología y Recursos Minerales - SEGEMAR. *Geología Argentina, Anales* 29: 779-784.
- Costa, C. H. 2004. ¿Microtectónica en el Cuaternario?: Métodos y aplicaciones de la paleoseismología. *Revista de la Asociación Geológica Argentina, Serie D: Publicación Especial* 7: 9-19.
- Costa, C. H. y C. Vita Finzi 1996. Late Holocene faulting in the Southeast Sierras Pampeanas of Argentina. *Geology* 24: 1127-1130.
- Costa, C. H., Murillo, V., Sagripanti, G. L. y Gardini, C. 2001. Quaternary intraplate deformation in the southeastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of Seismology* 5: 399-409.
- Crone, A., Machette, M. y Bowman, R. 1997. Episodic nature of earthquake activity in stable continental regions revealed by paleoseismicity studies of Australian and North American Quaternary faults. *Australian Journal of Earth Sciences*: 203-214.
- Gallo, M. 2011. Estudio neotectónico de la falla Sierra Chica en la sección Las Peñas-Los Cóndores. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 103 p., Río Cuarto.
- Jordan, T. E. y Allmendinger, R. W. 1986. The Sierras Pampeanas of Argentina; a modern analogue of Rocky Mountain foreland deformation. *American Journal of Science* 286: 737-764.
- Jordan, T. E., Isacks, B., Allmendinger, R. W., Bremen, J. y Ramos, V. A. 1983. Andean Tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate: Geological Society of America *Bulletin* 94: 341-361.
- Keller, E. y Rockwell, T. 1984. Tectonic geomorphology, Quaternary chronology and paleoseismicity. En J. E. Costa and P. J. Fleisher (ed.) *Developments and applications of geomorphology*: 203-239, Berlin Heidelberg
- Machette, M. 1989. Dating methods applicable to Quaternary geologic studies in the western

- United States. Utah Geological and Mineral Survey, Miscellanium publication 89-7.
- Massabié, A., Cegarra, M. y Sanguinetti, A. 2006. Estructura y edad de fallamiento cuaternario a la latitud de Biale Massé, Sierra Chica de Córdoba. 12° Reunión sobre Microtectónica y Geología Estructural. Asociación Geológica Argentina, publicación especial 9: 107-112. Salta.
- Mayer, L. 1984. Dating Quaternary fault scarps formed in alluvium using morphologic parameters. *Quaternary Research* 22: 300-313.
- Mc Calpin, J. P. 1996. *Paleoseismology*. Academic Press 587 p., Los Angeles.
- Menges C. M. 1990. Late Quaternary fault scarps, mountain-front landforms, and Pliocene-Quaternary segmentation on the range-bounding fault zone, Sangre de Cristo Mountains, New Mexico. *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 3: 131-156.
- Mingorance, F. A. 1991. Análisis y evaluación del tectonismo reciente asociado a la falla Sampacho, provincia de Córdoba, Argentina Central. *Instituto Panamericano de Geofísica e Historia* 35: 13-39. México.
- Pantosti, D. y Yeats, R. 1993. Paleoseismology of great earthquakes of the late Holocene. *Annali di Geofisica* 36: 237-257
- Philip, H., Avagyan, A., Karakhanian, A., Ritz, J.F. y Rebai, S. 2001. Estimating Slip Rates and Recurrence Intervals for Strong Earthquakes Along an Intracontinental Fault: Example of the Pambak-Sevan-Sunik Fault (Armenia). *Tectonophysics* 343: 205-232.
- Pilger, R. 1981. Plate reconstructions, aseismic ridges, and low-angle subduction beneath the Andes. *Geological Society of America Bulletin Part 1*, 92: 448-456.
- Ramos, V. A. 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino. *Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales* 29: 715-784.
- Ramos, V. A., Cristallini, E. y Pérez, D. 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 59-78.
- Sagripanti, G. L. 2006. Neotectónica y peligro sísmico de la región de Sampacho, departamento Río Cuarto. Provincia de Córdoba. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 300 p., Río Cuarto.
- Sagripanti, G. L. y Villalba, D. 2006. Estructuras deformacionales en sedimentos no consolidados asociadas a terremotos prehistóricos. Falla Las Lagunas, Sampacho. Córdoba. 3° Congreso Nacional de Cuaternario y Geomorfología, Actas 1: 377-386, Córdoba.
- Sagripanti, G. L. y Villalba, D. 2009. Paleosismicidad y estimación del intervalo de recurrencia de fuertes terremotos asociados a fallas de intraplaca a la latitud de 33° S: Falla Las Lagunas, Sampacho, Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 417-428.
- Sagripanti, G. L. y Villalba, D. 2011. Movimientos prehistóricos y recientes en la intraplaca argentina a la latitud 33° S, falla Las Lagunas, Sampacho, Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68: 491-501.
- Sagripanti, G., Schiavo, H., Felizzia, J., Villalba, D., Aguilera, H., Giaccardi, A. y Membrives, J. 2011. Fuertes paleosismos de intraplaca y sus retornos vinculados a la falla Las Lagunas, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68: 52-70.
- Sagripanti, G. L., Villalba, D., Grosso, M. V. y Daga, R. B. 2003. Análisis morfológico de escarpas, aplicado a la reconstrucción de la sismicidad prehistórica de la falla Las Lagunas, Sampacho, Córdoba. 2° Congreso Nacional de Cuaternario y Geomorfología, Actas 1: 369-377, Tucumán.
- Schlagintweit, O. 1954. Una interesante dislocación en Potrero de Garay (valle de Calamuchita) y observaciones sobre la Sierras Chica y Grande de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 9: 135-154.
- Seitz, C. 2009. Relevamiento neotectónico de nuevas secciones de la falla Las Lagunas, sur de Córdoba. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 102 p., Río Cuarto.
- Smalley, R. Jr., Pujol, J., Regnier, M., Chiu, J.-M., Chatelain, J.-L., Isacks, B. L., Araujo, M. y Puebla, N. 1993. Basement seismicity beneath the Andean Precordillera thin-skinned thrust belt and implications for crustal and lithospheric behavior. *Tectonics* 12: 63-76.
- Stewart, I. 1993. Sensitivity of fault-generated scarps as indicators of active tectonism: Some constraints from the Aegean region. En Thomas, D. S. G. and Allison, R. J., (ed.) *Landscape sensitivity*. Wiley y Sons Ltd.: 129-147 Hoboken, Nueva Jersey.
- Vanneste, K., M. Meghraoui y Camelbeeck, T. 1999. Late Quaternary earthquake-related soft-sediment deformation along the Belgian portion of the Feldbiss Fault, Lower Rhine Graben system. *Tectonophysics* 309: 57-79.
- Villalba, D. 2011. Estudio neotectónico y geodésico tendiente a comprobar movimientos prehistóricos y recientes de la falla Las Lagunas, Sampacho. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 142 p., Río Cuarto.
- Wagner-Manslau, A. 1988. Estudio geológico-estructural del valle de Calamuchita entre Villa General Belgrano y Santa Rosa de Calamuchita. Provincia de Córdoba. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Buenos Aires (inédita), 73 p., Buenos Aires.
- Wallace, R. E. 1977. Profiles and ages of young fault scarps, north-central Nevada. *Geological Society of America Bulletin* 88: 1267-1281.
- Wallace, R. 1986. *Active tectonics*, National Academy Press, 266 p., Washington.
- Yeats, R., Sieh, K. y Allen, C. 1997. *The geology of earthquakes*. Oxford University Press, 568 p., New York.

Recibido: 23 de julio, 2013

Aceptado: 4 de noviembre, 2013