



# Deformaciones holocenas en el piedemonte oriental de la sierra de Comechingones, falla Las Lagunas, Sierras Pampeanas de Córdoba

**Guillermo SAGRIPANTI<sup>1</sup> y Diego VILLALBA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Geología. Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba.

Email:gsagripanti@exa.unrc.edu.ar

**Editor:** Fernando Hongn

Recibido: 30 de julio, 2019

Aceptado: 26 de noviembre, 2019

## RESUMEN

En las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis se reconocen las deformaciones neotectónicas más orientales del segmento de subducción subhorizontal Pampeano. Las correspondientes al sector de fallamiento cuaternario se ubican en las escarpas próximas al frente de levantamiento occidental de las sierras de Córdoba y San Luis, y en el piedemonte circundante a las mismas como es el caso del sector oriental de la sierra de Comechingones, donde se ubican fallas de movimiento inverso como la de Las Lagunas, entre otras. El objetivo de la presente contribución es reportar deformaciones holocenas ubicadas en un sector del piedemonte oriental de la sierra de Comechingones. Las deformaciones dúctiles relevadas como pliegues, geometría monoclinial y flexura anticlinal, presentes en sedimentos no consolidados, permiten confirmar la actividad holocena de la falla Las Lagunas. Además, se considera a estas deformaciones como características de las fallas inversas con actividad cuaternaria presentes en este ámbito pedemontano. La geometría de las deformaciones dúctiles y frágiles, su ubicación espacial en el perfil y la falta de evidencia de ruptura en superficie de la falla, permiten suponer que el comportamiento de esta estructura podría corresponder a una falla inversa de bajo ángulo, no emergente o ciega.

**Palabras clave:** *falla Las Lagunas, Holoceno, pliegues, plegamiento monoclinial.*

## ABSTRACT

*Holocene deformations in the Eastern Piedmont of the Comechingones mountain range, Las Lagunas fault, Sierras Pampeanas of Córdoba.*

The easternmost neotectonic deformations of the sub-horizontal Pampeano subduction segment are recognized in the Sierras Pampeanas of Córdoba and San Luis. Those corresponding to the quaternary fault front are located in the escarpments near the western uprising front of the Córdoba and San Luis mountains, and in the piedmont surrounding them, as is the case of the eastern sector of the Comechingones mountain range, where reverse faults such as Las Lagunas, among others, are located. This contribution aims to report Holocene deformations located in a sector of the eastern piedmont of the Comechingones mountain range. The ductile deformations revealed as folds, monocline geometry, and anticlinal flexure, present in unconsolidated sediments, allow us to confirm the Holocene activity of Las Lagunas fault. Besides, these deformations are characteristic of the reverse faults with quaternary activity present in this area of piedmont. The geometry of the ductile and fragile deformations, their spatial location in the profile, and the lack of evidence of rupture in the surface of the fault, allow us to assume that the behavior of this structure could correspond to a low-angle, non-emergent, or blind reverse fault.

**Keywords:** *Las Lagunas fault, Holocene, folds, monoclinial folding.*

## INTRODUCCIÓN

El levantamiento de las Sierras Pampeanas entre los 27° 30'-33° 30' S desde el Mioceno-Plioceno ha estado controlado por la subducción subhorizontal de la placa de Nazca. Algunas de las características más importantes entre estas latitudes es la ausencia de actividad volcánica y la distribución bimodal que tiene la actividad sísmica, distinguiéndose de interplaca y cortical, con hipocentros localizados entre 90-120 km y en los 25 km más superficiales de la corteza, respectivamente. Estos rasgos distintivos resultan del régimen de subducción que caracteriza esta región (Pilger 1981, Jordan et al. 1983, Jordan y Allmendinger 1986, Smalley et al. 1993, Costa y Vita Finzi 1996, Ramos 1999, Ramos et al. 2002, Alvarado et al. 2005, Richardson et al. 2012).

En las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis se reconocen las deformaciones neotectónicas más orientales del segmento de subducción subhorizontal Pampeano, las cuales están vinculadas a fallas de movimiento inverso, con inclinación al E y SE, que integran los principales sistemas de fallas denominados Sierra Chica y Comechingones (Fig. 1). Estas deformaciones, que corresponden al frente de fallamiento cuaternario, se ubican en las escarpas próximas al frente de levantamiento occidental de las sierras de Córdoba y San Luis, como también en el piedemonte circundante a las mismas (Costa et al. 2000, 2001, 2014, Sagripanti et al. 2009, 2012, 2018).

En el sector circunscripto a los 33° LS, además de las deformaciones *on fault* y *off fault* relevadas y asociadas a fallas sismogénicas, se ha interpretado la ocurrencia de fuertes paleoterremotos durante el Neógeno-Cuaternario que habrían alcanzado una magnitud entre M 6.6 y M 7.0, como es el caso de las fallas El Molino, Las Lagunas y Las Peñas, entre otras (Costa et al. 2000, 2018, Sagripanti et al. 2018). Se considera que estos valores determinados de paleomagnitud son importantes para una región de intraplaca y que además, los mismos superan los registros de magnitud de sismos históricos con epicentro en la región. También, se consideran de alto interés para la valoración del potencial sismogénico asociado a estas estructuras y para su extrapolación a otras fallas emplazadas en la región que presentan evidencias de deformaciones similares (Sagripanti et al. 2012, 2018, Costa et al. 2018).

Detectar la expresión morfológica asociada a fallas cuaternarias inversas que se encuentran en el piedemonte y alejadas del frente de levantamiento principal de las sierras, resulta dificultoso porque las deformaciones son muy sutiles y normalmente desarrolladas en sedimentos no consolidados.

Este inconveniente se vincula al bajo ángulo de buzamiento de los planos de las fallas, al reducido desplazamiento por evento, a la baja tasa de movimiento y a que el espesor de los sedimentos cuaternarios no consolidados puede ser importante en algunos sectores, entre otros. Todo esto puede contribuir a que las morfologías resultantes se obliteren rápidamente y no se preserven.

En el caso de fallas inversas no emergentes, normalmente tienen asociada la presencia de pliegues y flexuras en la superficie que dependen de la geometría del plano, de la profundidad de la falla y de la respuesta de los materiales superficiales a la propagación del extremo de la misma. La geometría de la mayoría de estos pliegues es característica, normalmente anticlinales por flexión de falla y asimétricos, con flancos planos, siendo uno de mayor pendiente que el otro que es más tendido. Las dimensiones de las estructuras resultantes están en relación directa con la profundidad a la que la falla transmite el empuje, si la misma es superficial los pliegues que se producen están lo suficientemente próximos como para generar escarpas múltiples similares a las originadas por fallas distributivas (McCalpin 1997, 2009; Yeats et al. 1997).

En el ámbito pedemontano oriental de la sierra de Comechingones, región que ha estado sometida a un régimen de acortamiento neógeno-cuaternario, las deformaciones asociadas a fallas de movimiento inverso, cuaternarias, no presentan morfologías diagnósticas. Sin embargo, se supone que los movimientos asociados a estas fallas han dejado evidencias de deformaciones con características particulares en sedimentos no consolidados holocenos.

El objetivo de la presente contribución es reportar deformaciones holocenas ubicadas en un sector del piedemonte oriental de la sierra de Comechingones.

La zona de estudio se sitúa al sudoeste de la provincia de Córdoba, al este de la sierra de Comechingones entre las localidades de Achiras y Sampacho donde se ubica la falla Las Lagunas (Fig. 1).

En este sector del piedemonte se encuentran varias fallas con actividad cuaternaria comprobada que desde hace varios años están siendo analizadas con el fin de conocer el potencial sismogénico asociado. El estudio realizado para esta contribución es una continuidad de las investigaciones neotectónicas y paleosismológicas que se vienen desarrollando en estas estructuras (Sagripanti y Villalba 2009, 2011, Villalba y Sagripanti 2014, Sagripanti et al. 2009, 2011, 2012, 2014, 2018), cuyos resultados serán un aporte al conocimiento sobre las deformaciones holocenas características de este sector y el primer reporte sobre el comportamiento de las fallas inversas presentes en este ámbito.

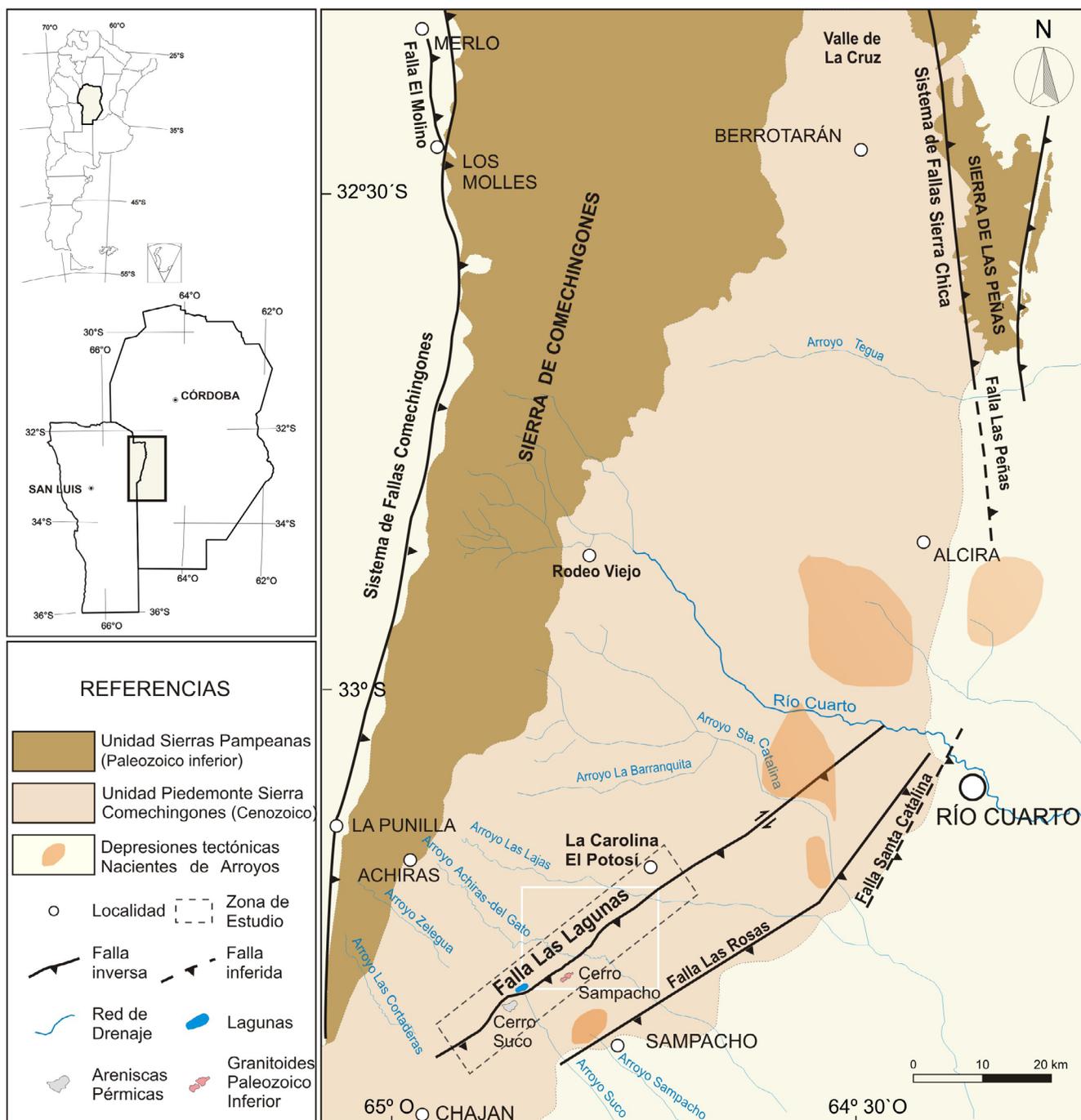


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio, estructuras principales y unidades geomorfológicas, modificado de Sagripanti et al. (2018). El recuadro blanco indica aproximadamente el área de la figura 3.

## MARCO NEOTECTÓNICO Y PALEOSISMICIDAD

Las principales deformaciones neotectónicas presentes en las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis, que han sido detectadas y analizadas por numerosos autores, mayormente se encuentran ubicadas en el sector occidental de los frentes de levantamientos de las sierras de Comechingones y

sierra Chica, éstos son controlados por sistemas de fallas de empuje que se ubican marginalmente a los bloques levantados y basculados del basamento cristalino (Fig. 1).

En general las deformaciones cuaternarias son de escasa extensión superficial y se ubican en sectores que se caracterizan por encontrarse intensamente fracturados. Las mismas están asociadas a fallas inversas lísticas con planos buzando al E y SE donde el bloque elevado formado por basamento

crystalino, de edad paleozoica, sobrecorre a depósitos de sedimentos cenozoicos definiendo una estructura de tipo *short-cut* (Kraemer et al. 1988, Massabie y Szlafsztein 1991, Costa y Vita Finzi 1996, Costa 1999, Costa et al. 2000, 2001, 2014, Massabie et al. 2006, Sagripanti et al. 2012).

Si bien, en el ámbito del piedemonte las deformaciones superficiales asociadas a fallas inversas sismogénicas y en algunos casos a posibles fallas no emergentes o ciegas son escasas y normalmente no son diagnósticas, existen atributos morfológicos y morfohidrológicos que permiten detectar la presencia de este tipo fallas con actividad cuaternaria. Entre ellos se pueden citar a niveles sedimentarios basculados en el mismo sentido que inclina el plano de falla, la presencia de depresiones tectónicas que forman áreas planas y anegadizas consideradas como depresiones hidrohalomórficas, arroyos que poseen tramos rectos en incisión con frentes activos de erosión retrocedente y las variaciones en la sinuosidad de cauces, dirección de escurrimiento, pendiente y ancho de valle (Sagripanti et al. 2011, 2018).

Estudios neotectónicos realizados en fallas inversas con actividad cuaternaria asociada y buzamiento al E-SE que están ubicadas en el ámbito del piedemonte oriental de la sierra de Comechingones y occidental de la Sierra Chica ( $32^{\circ} 30' - 33^{\circ} 30' S$ ), como las denominadas Las Lagunas, Las Rosas, Santa Catalina y Las Peñas (Fig. 1) han permitido reportar deformaciones neógeno-cuaternarias en sedimentos no consolidados loessoides y lagunares. En estos estudios se han utilizado técnicas geofísicas, paleosismológicas y análisis de los atributos morfológicos y morfohidrológicos (Sagripanti y Villalba 2009, 2011, Villalba y Sagripanti 2014, Sagripanti et al. 2011, 2012, 2014, 2018).

Los antecedentes neotectónicos y paleosismológicos de este ámbito pedemontano permiten considerar a la falla Las Lagunas como una de las más importantes por la expresión en superficie de algunas de sus secciones, por poseer paleoterremotos asociados y porque es la causal del "Gran Terremoto de Sampacho" del año 1934, que alcanzó una magnitud (Richter) M 6.0 (Sagripanti et al. 2011).

La falla Las Lagunas es de movimiento inverso con componente de rumbo dextral y una orientación entre  $037^{\circ} - 055^{\circ}$  y plano buzando al SE (Fig. 1). A lo largo de su trazo de aproximadamente 54 km presenta en el extremo SO una morfología superficial compuesta por escarpas y pequeñas escarpas desarrolladas en sedimentos holocenos, mientras que, en el extremo NE no posee expresión superficial a excepción de algunos sectores donde se reconoce un resalto topográfico de escasa altura suavizado por la erosión de los sedimentos que lo forman (Sagripanti et al. 2011). Algunos de los parámetros

sismogénicos determinados son el desplazamiento cosísmico por evento de 0.30 m, la tasa de movimiento de 0.25 mm/año, el período de recurrencia entre 0.92-1.2 ka y la paleomagnitud de M 6.9-7.0 (Sagripanti y Villalba 2009, 2011, Sagripanti et al. 2009, 2011, 2012, 2014, Villalba y Sagripanti 2014).

La paleosismicidad en este ámbito pedemontano, ubicado al sur de la provincia de Córdoba, se considera importante para esta región de intraplaca debido a las deformaciones cosísmicas relevadas, eventos paleosísmicos interpretados y paleomagnitud estimada, que ponen en evidencia la ocurrencia de fuertes paleoterremotos en este sector que ha estado sometido a movimientos y deformaciones resultantes de un régimen tectónico de acortamiento neógeno-cuaternario.

Estudios paleosismológicos realizados en las fallas con actividad cuaternaria presentes en el ámbito del piedemonte oriental de las sierras de Comechingones han permitido interpretar la ocurrencia de varios terremotos prehistóricos fuertes en la región, siendo algunos de éstos adjudicados a la falla Las Lagunas donde en los últimos 4000 años han ocurrido al menos cuatro paleoterremotos que habrían alcanzado una M-7.0 (Sagripanti et al. 2011). Por otra parte, en la falla Las Peñas que forma parte del Sistema de Fallas de la Sierra Chica y ubicada en el piedemonte occidental de la sierra homónima, a partir de evidencias de deformaciones cosísmicas relevadas en sedimentos cuaternarios se ha interpretado la ocurrencia de, al menos, dos terremotos prehistóricos fuertes uno asignado al Pleistoceno superior y el otro al Holoceno superior que habrían alcanzado una M = 6.9 (Sagripanti y Villalba 2011, Sagripanti et al. 2009, 2011, 2012).

En la actualidad la sismicidad cortical en este ámbito pedemontano es frecuente y los registros instrumentales indican que es entre leve y moderada. La mayoría de los sismos registrados son de  $M \leq 3.0$  y al menos, cuatro han sido mayores a M 4.0 (Sagripanti et al. 2011, 2012, 2018).

## METODOLOGÍA

La metodología seguida es la que se aplica en investigaciones neotectónicas y comprende distintas etapas de gabinete y campo. En el desarrollo de estas etapas se realizó el inventario, análisis y selección de antecedentes geológicos, geomorfológicos, neotectónicos y paleosismológicos. Se llevó a cabo la toma de fotos aéreas oblicuas a baja altura y con bajo ángulo de incidencia solar sobre el trazo de la falla para detectar deformaciones sutiles sobre la superficie que permitan definir potenciales sitios a excavar. Posteriormente se excavaron tres trincheras en sitios predeterminados que

corresponden a perfiles naturales presentes en dos arroyos y otra en una cárcava.

En las trincheras la técnica seguida para el relevamiento de los contactos litológicos, estructuras y rasgos de interés fue estableciendo un marco de referencia que se materializó con una cuadrícula nivelada de 1 x 1 m y 0.50 x 1 m, y en un caso se generó una línea de referencia horizontal, en las que se definió un sistema de coordenadas cartesianas para cada perfil. Luego se realizó la toma de fotografías (*foto-logging*) de cada cuadro de la cuadrícula a una distancia focal constante y posteriormente se dibujaron sobre la foto, con el mayor detalle posible, los rasgos detectados en la exposición lográndose el *logging* o representación gráfica del perfil de la trinchera. Las estructuras reconocidas son descriptas como frágiles o dúctiles de acuerdo con su comportamiento reológico.

## MARCO ESTRATIGRÁFICO Y GEOMORFOLÓGICO

Las unidades estratigráficas presentes en el sector de estudio se describen a continuación y se muestran en un cuadro de síntesis (Fig. 2).

### Formación La Invernada

Está compuesta por limos retransportados con gravillas; se observan estructuras de flujo indicando que el loess serrano fue removido por procesos aluviales y gravitatorios. Se la considera como un manto de loess que cubre grandes superficies en la llanura e incluso en las pampas de altura de las sierras de Córdoba.

La edad asignada por Cantú (1992) es Pleistoceno superior tardío a Holoceno bajo y determinaciones posteriores realizadas mediante una datación por Luminiscencia Óptica-

mente Estimulada (OSL) dieron como resultado 63,1 ka para la base de la formación y 12.8 ka para el techo (Cantú et al. 2006). Se designa como unidad A en la presente contribución.

### Paleosuelo Las Tapias

Sobre los sedimentos eólicos de la Formación La Invernada se ha desarrollado un paleosuelo, que tiene una importante distribución geográfica, ya que, no sólo está presente en la llanura sino también en las pampas de altura de las Sierras Pampeanas.

De acuerdo con Cantú (1992) la edad estimada para el desarrollo de este paleosuelo es en su base entre 12.8 y 9.0 ka, y en el techo se establece que puede coincidir, para esta región, con el final del *Optimum Climaticum*, entre 5.2 y 4.0 ka. Se designa como unidad B en la presente contribución.

### Formación Arroyo Las Lajas

Está compuesta por sedimentos clásticos, gravas a arenas y limos arcillosos, en función del aumento de distancia a las sierras. Su origen es coluvial, fluvial y fluvio-lagunar. Se la asigna al Holoceno inferior-medio (Cantú 1992). Se designa como unidad C en la presente contribución.

### Formación Laguna Oscura

La constituyen sedimentos eólicos, arenosos muy finos y limosos, y tiene una amplia distribución en la región sur de la provincia de Córdoba. El techo o sección superior aflorante puede reconocerse edafizado o con depósitos medanosos. Cantú (1992) la asignó al Holoceno superior-actualidad y de acuerdo con determinaciones por OSL la edad es entre 3.7 ka y 4.2 ka (Cantú et al. 2006). Se designa como unidad D en la presente contribución.

### Depósitos Lagunares

Son sedimentos de origen lagunar, arcillosos con materia orgánica, oscuros, con intercalaciones de niveles limosos de color pardo. Estos depósitos se encuentran en depresiones tectónicas que forman áreas planas y anegadizas con el nivel freático próximo a la superficie o aflorando, que en algunos casos favorecen el emplazamiento de lagunas y humedales.

El espesor de estos depósitos en el sector de estudio es de, al menos, 1 m y su edad radiocarbónica convencional es de 3770 ± 90 a AP para su base, de 2820 ± 60 a AP en la parte central y de 1780 ± 50 a AP el techo (Sagripanti et al. 2011). Se designa como unidad E en la presente contribución.

### Geomorfología

Las sierras de Córdoba son bordeadas por un piedemon-

PERÍODO	ÉPOCA	FORMACIÓN	UNIDAD EDAFO-ESTRAT.	DEPOS. LAGUN.	TRINCHERA LAS LAJAS	TRINCHERA Del GATO	TRINCHERA CHAÑARITOS
CUATERNARIO	HOLOCENO	Sup. Laguna Oscura	Suelo Act.	Sed. Lag.			
		Med. Arroyo Las Lajas					
		Inf. La Invernada	Suelo Las Tapias				
	PLEISTOCENO	Sup.					

UNIDAD A UNIDAD B UNIDAD C UNIDAD D UNIDAD E SUELO ACTUAL

Figura 2. Unidades estratigráficas presentes en el sector de estudio.

te que constituye una zona de transición entre el ambiente serrano y la llanura. La misma se extiende desde los últimos afloramientos del área positiva serrana hasta aproximadamente la curva de nivel de 300 m s.n.m. donde se observa un cambio considerable de la pendiente.

La unidad geomorfológica Piedemonte Oriental de la Sierra de Comechingones es una de las unidades definidas para la provincia de Córdoba por Carignano et al. (2014). Esta unidad tiene un ancho promedio entre 20 y 35 km, y se extiende desde el valle de la Cruz al norte hasta proximidades de la localidad de Chajan al sur (Fig. 1).

El basamento cristalino, Paleozoico inferior, de la sierra de Comechingones en esta zona de transición es sepultado por sedimentos aluviales y loessoides, donde la morfología superficial posee una fuerte ondulación generada por lomas bajas que son controladas por la presencia de bloques de basamento diferencialmente desplazados o ascendidos por la actividad neógeno-cuaternaria. Estas morfologías que integran el ámbito pedemontano van disminuyendo de altura hacia el E y SE, donde se van integrando con la Llanura Pampeana (Carignano et al. 2014).

La unidad Piedemonte Oriental de la Sierra de Comechingones de acuerdo con estas características ha sido dividida en tres sectores denominados: valle de La Cruz, al norte, Rodeo Viejo en la parte central y Achiras al sur (Fig. 1).

El sector Achiras, donde se ubica la zona de estudio, presenta una morfología ondulada caracterizada por lomas bajas que disminuyen de altura hacia el E-SE, con pendientes entre 0.5-1 % y desniveles locales entre 30 y 40 m. En algunas lomas se puede reconocer el basamento aflorando, aunque la mayoría de estas están formadas por depósitos de sedimentos eólicos retransportados en forma de flujos densos o en manto que son aportados desde las sierras (Cantú et al. 2006). En el límite oriental de este sector se encuentran afloramientos aislados de basamento (Paleozoico inferior) en el cerro Sampacho y rocas sedimentarias como areniscas cuarcíticas pérmicas en el cerro Suco (Fig. 1). La mayor parte de este ámbito está cubierto por sedimentos loessoides que corresponden a la Formación Laguna Oscura de edad holocena. Además, se reconocen afloramientos de sedimentos fluviales, lagunares y paleosuelos.

La red de drenaje está formada por arroyos de régimen permanente como La Barranquita, Las Lajas, Achiras-del Gato, Zelegua y Las Cortaderas, entre otros (Fig. 1). La mayoría posee un diseño rectilíneo con tramos de baja sinuosidad y algunos presentan frentes activos de erosión retrocedente. En este sector se reconocen lagunas y humedales asociados a cubetas de deflación y también emplazadas en bajos

tectónicos, normalmente correspondientes al bloque hundido de fallas inversas presentes en el sector como la de Las Lagunas, Las Rosas, Santa Catalina, entre otras (Sagripanti et al. 2018). Estos relieves deprimidos resultan de la actividad neotectónica en la región y corresponden a la subunidad geomorfológica Depresiones tectónicas nacientes de arroyos (Fig. 1). Son de extensión superficial variable, forman áreas planas y anegadizas con el nivel freático próximo a la superficie o aflorando, donde en algunos casos funcionan como nacientes de arroyos como Sampacho y Suco, entre otros. En estos ambientes de depresiones se observan costras salinas que son sometidas a procesos de deflación en períodos secos (Degiovanni et al. 2014).

## CARACTERIZACIÓN DE LAS DEFORMACIONES HOLOCENAS

Las deformaciones relevadas en los distintos perfiles se han desarrollado en sedimentos finos no consolidados mayormente loessoides y lagunares en algunos casos. Por lo tanto, su detección y relevamiento ha sido con un cierto grado de dificultad ya que las posibilidades de preservación de las estructuras son difíciles en materiales con estas características.

La presentación de los perfiles de las tres trincheras relevadas, denominadas Las Lajas, del Gato y Chañaritos, es de acuerdo con su ubicación sobre el trazo de la falla Las Lagunas, de NE a SO. La distancia entre las trincheras Las Lajas-del Gato es de 10 km y entre las del Gato-Chañaritos de 5 km (Fig. 3).

### Trinchera Las Lajas

La trinchera Las Lajas (33°12'42"S - 64°42'31"O) se ubica en la margen derecha del arroyo homónimo en proximidades de la localidad de La Carolina, El Potosí (Figs. 1, 3 y 4), sobre el trazo de la falla que en este sector posee una orientación de 045°. El perfil natural de la trinchera está orientado 160° y sus dimensiones son de aproximadamente 12,0 m de largo por 8,0 m de alto (Fig. 5).

Las unidades aflorantes en el perfil de la trinchera, descritas de base a techo, son:

**Unidad A:** Sedimentos limo-arenosos poco consolidados, de color pardo-rojizo, correspondientes a la Formación La Invernada, siendo su espesor de aproximadamente 4.0 m.

**Unidad B:** Sobreyacen a la unidad anterior sedimentos de una secuencia limo-arenosa fina con mayor grado de cementación con carbonatos que la anterior, de color pardo rojizo



En este sector y próximo al extremo SE de la trinchera se reconoce un resalto topográfico bien definido a lo largo del trazo de la falla que corresponde a una escarpa contrapendiente, de aproximadamente 4.0 m de altura, desarrollada en sedimentos no consolidados correspondientes a la unidad D (Figs. 6 y 7).

Las unidades presentes en el perfil de la trinchera descriptas de base a techo son:

**Unidad D:** Está formada por sedimentos limosos color pardo rojizo de un depósito eólico que se asigna a la Formación Laguna Oscura y cuyo espesor aflorante es de 3.5 m. La parte superior de esta unidad se encuentra edafizada.

**Unidad E:** Sobreyace a la unidad D y está formada por sedimentos de origen lagunar finos como arcillas con materia orgánica e intercalaciones de materiales limosos.

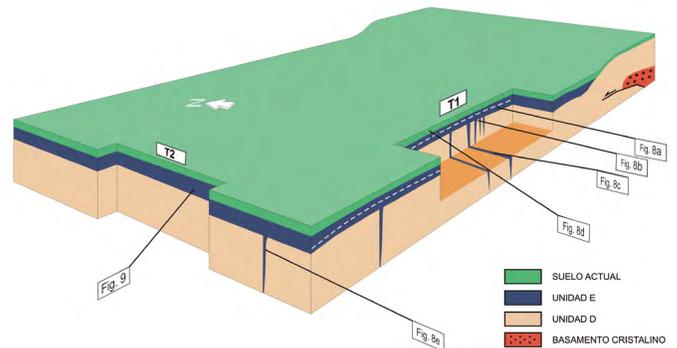
En el perfil de la trinchera (T1) se han reconocido deformaciones tanto dúctiles como frágiles. Las evidencias de deformaciones dúctiles corresponden a pliegues de escala mesoscópica afectando a los sedimentos lagunares de la unidad E, que se reconocen principalmente entre los m 30-38, con vergencia hacia el NO (Fig. 8a) y un arco convexo hacia arriba del contacto entre el techo de la unidad D y la base del nivel lagunar (unidad E) que describe una geometría correspondiente a una flexura anticlinal abierta (Fig. 7) que afecta a las dos unidades principalmente entre los m 30-50, presentando además la unidad E un arqueamiento en su interior. La orientación de los ejes de estas estructuras es de  $045^\circ$  aproximadamente paralelos al rumbo de la falla.

Las deformaciones frágiles de escala mesoscópica presentes, principalmente entre los m 30-50, son grietas de tensión cuya actitud es sub-vertical y paralela al rumbo de la falla (Figs. 8b y c). Las características de las mismas son que se han desarrollado dentro de la unidad D, tienen un ancho variable entre 0.02 y 0.05 m siendo éste mayor en el techo de la unidad y menor hacia la base de la misma y que se encuentran rellenas con los sedimentos lagunares que les sobreyacen de la unidad E. Otras grietas de tensión de menor expresión han sido detectadas también, entre los m 30-50, en el suelo actual que le sobreyace a la unidad E con una actitud similar a las descriptas anteriormente (Fig. 8d). La mayoría de estas estructuras están concentradas en la zona de máxima curvatura de la flexura.

Por otra parte, grietas de tensión de similares características que las anteriores, sub-verticales y rellenas con sedimentos de la Unidad E también han sido reconocidas hasta una profundidad de, al menos, 3.5 m (Fig. 8e). Estas se encuentran en perfiles naturales del arroyo y poseen una



**Figura 6.** Foto aérea oblicua en donde se indican a la falla Las Lagunas con líneas de trazos, con línea continua la morfología superficial de la escarpa y con recuadros blancos en perspectiva la trinchera del Gato (T1 y T2).

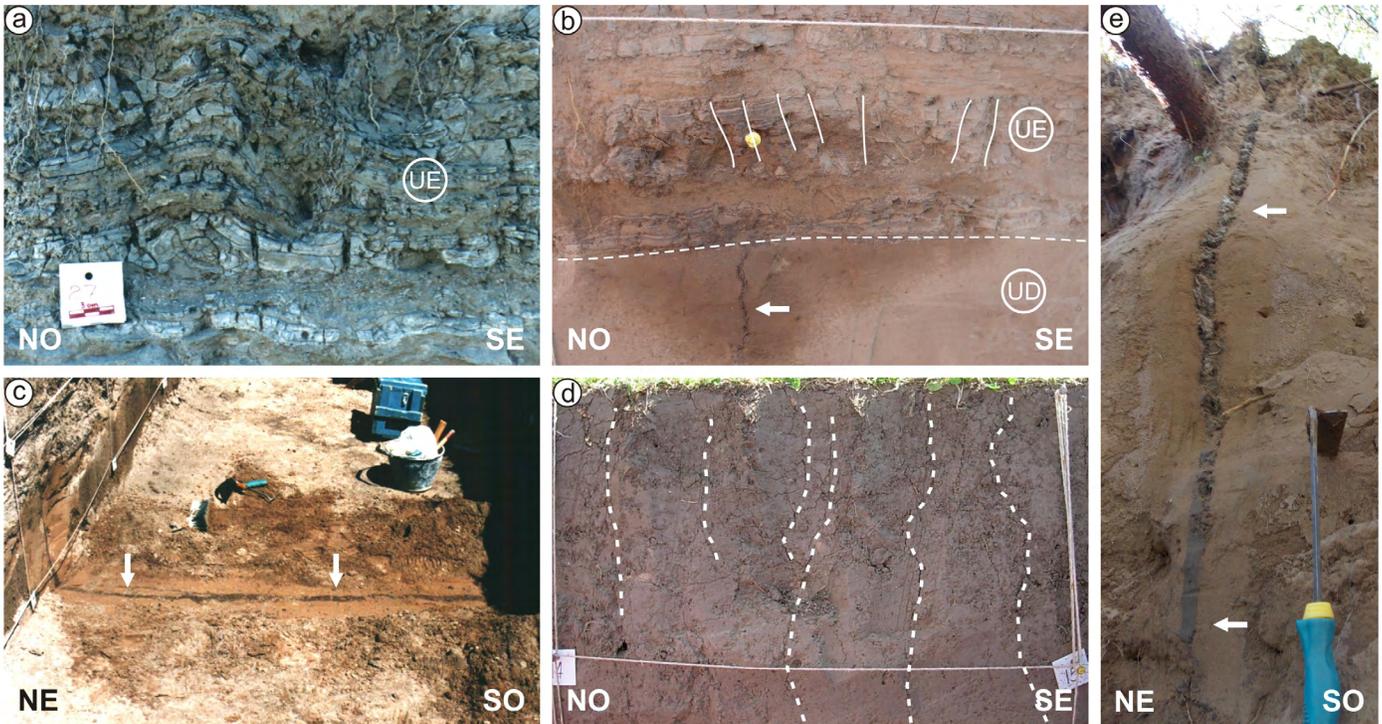


**Figura 7.** Representación tridimensional, sin escala, de la trinchera del Gato con la ubicación de los perfiles de T1 y T2, distribución de las grietas de tensión, escarpa y posición del basamento. Se indican las figuras correspondientes a las estructuras relevadas. Se representa la flexura anticlinal de los depósitos con una línea de trazos blanca.

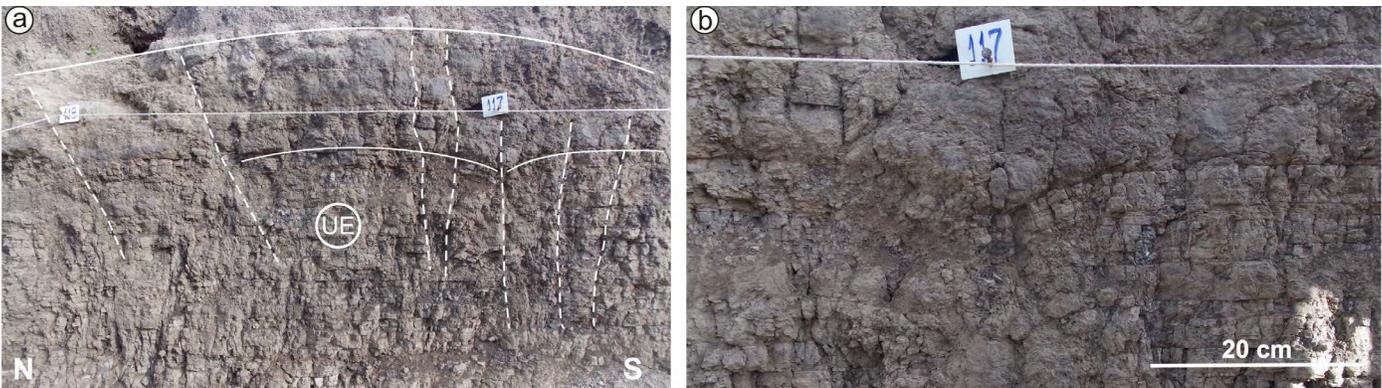
orientación tanto paralela como oblicua al rumbo de la falla.

En el perfil de la trinchera (T2) aproximadamente paralelo al rumbo de la falla (Fig. 7), también se han reconocido deformaciones de escala mesoscópica. Entre estas, flexuras anticlinales de los sedimentos lagunares y planos de discontinuidad correspondientes a grietas de tensión sub-verticales cuya orientación aproximada es  $130^\circ$ , formando un ángulo agudo ( $75^\circ$ ) con relación al rumbo de la falla, que generan la fracturación de la unidad E (Fig. 9a y b).

Se interpreta de acuerdo con la actitud y disposición en el perfil de las deformaciones tanto dúctiles como frágiles desarrolladas en sedimentos holocenos que las mismas responden al empuje generado por una falla de movimiento inverso. Por otra parte, se infiere que las grietas de tensión con orientación oblicua al rumbo de la falla posiblemente están asociadas a una descompresión durante el empuje, con componente de rumbo dextral, de los sedimentos del bloque colgante de la falla (Figs. 8e, 9a y b). Por lo tanto, resulta que estas deformaciones reconocidas en sedimentos no consolidados y asociadas a la presencia de la falla Las Lagunas posiblemente hayan sido generadas por reactivación de esta falla durante el Holoceno.



**Figura 8.** a) Detalle pliegues de escala mesoscópica en la unidad E; b) Grietas de tensión en las unidades D y E, la flecha indica una grieta rellena; c) Grieta de tensión rellena con sedimentos de la unidad E que atraviesa la trinchera indicada con flechas; d) Grietas de tensión sub-verticales en el suelo actual indicadas con línea de trazos; e) Grieta de tensión vertical rellena con sedimentos de la unidad E, de profundidad mayor a 3.50 m indicada con flechas. La longitud del scraper de escala es de 0.30 m.



**Figura 9.** a) Sector del perfil trinchera T2 donde se reconocen una flexura anticlinal indicada con línea continua blanca y grietas de tensión de escala mesoscópica, en la unidad E, indicadas con líneas de trazo; b) Vista ampliada de a) en el punto indicado como 117.

### Trinchera Chañaritos

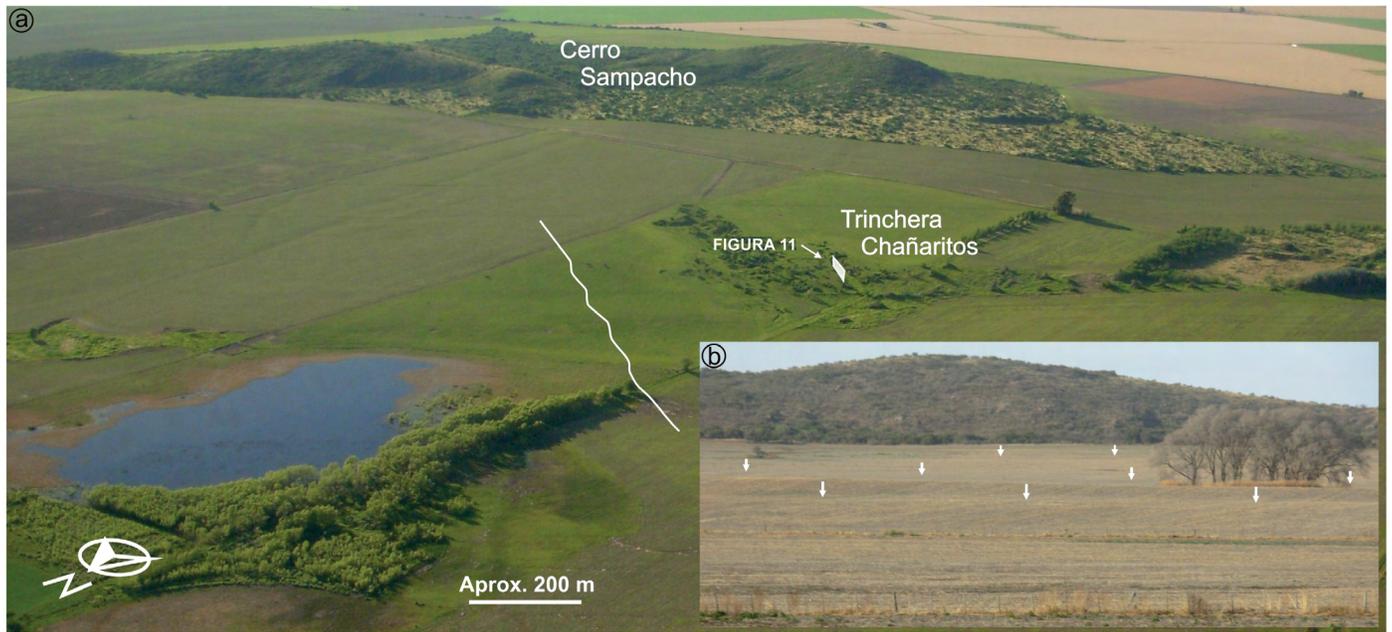
La trinchera se ubica en la estancia La Leona al N del cerro Sampacho ( $33^{\circ}18'28''$  S -  $64^{\circ}49'38''$  O) sobre el trazo de la falla Las Lagunas de orientación  $050^{\circ}$  en este sector (Figs. 3 y 10a). Su orientación es  $135^{\circ}$  y dimensiones de aproximadamente 7.0 m de largo por 1.5 m de alto.

En este sector en el desnivel topográfico que genera la presencia de la falla se emplazan lagunas temporarias en el bloque hundido de la misma (Fig. 10a) y se reconocen morfologías superficiales correspondientes a pequeñas escarpas con una orientación paralela al trazo de la falla (Fig. 10b). Una de estas morfologías que corresponde al sitio donde se

describió la trinchera Chañaritos, cuya altura es de 0.90 m, se presenta en una vista panorámica de mayor detalle (Fig. 11).

La unidad aflorante en el perfil de la trinchera, descrita de base a techo es:

**Unidad D:** Compuesta por sedimentos limosos color pardo rojizo de un depósito eólico correspondientes a la Formación Laguna Oscura que alcanza una potencia, de al menos, 1.5 m. En su base se ha determinado que tiene un mayor contenido de carbonatos y en la parte superior del perfil se encuentra edafizada con un espesor promedio de 0.25 m y mayor grado de dureza que el nivel al que sobreyace (Fig. 12).



**Figura 10.** a) Foto aérea oblicua en donde se visualiza el cerro Sampacho (granitoides) y una laguna no permanente en el bloque hundido de la falla Las Lagunas. Se indica un perfil de las pequeñas escarpas con línea continua y con el recuadro blanco en perspectiva la trinchera Chañaritos; b) Vista panorámica desde NO hacia SE donde se visualiza la expresión morfológica de las pequeñas escarpas indicadas con flechas y el cerro Sampacho de fondo.

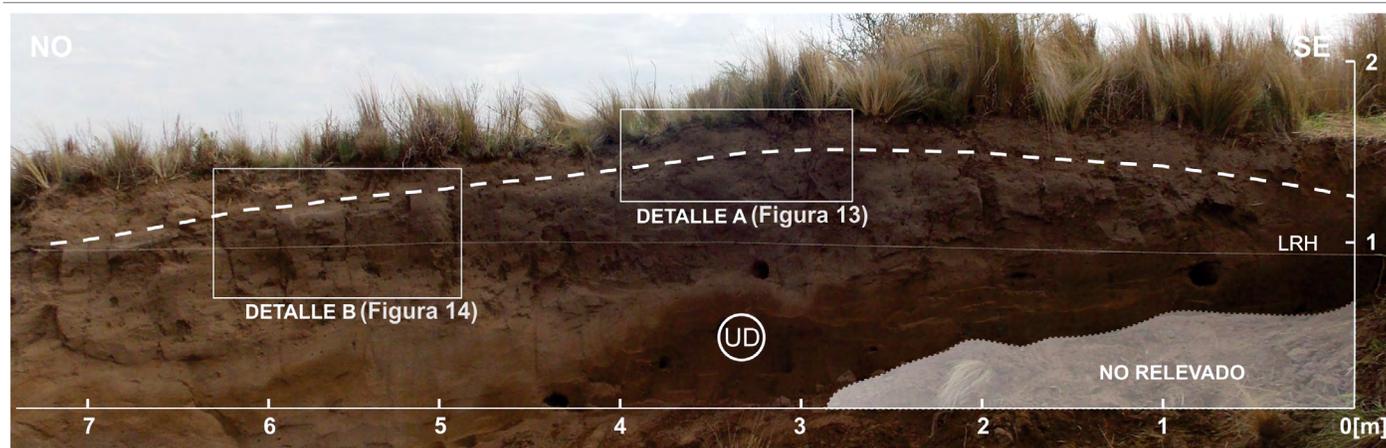


**Figura 11.** Vista panorámica desde el oeste de la morfología superficial donde se ubica la trinchera Chañaritos. Las flechas indican la ubicación de pequeñas escarpas.

Si bien se dificulta reconocer deformaciones en los sedimentos loessoides en el perfil de la trinchera se ha detectado deformación dúctil afectando a la unidad D siendo más notoria en el límite con el nivel edafizado y en la superficie, que se manifiesta como la geometría de una flexura anticlinal con visible asimetría, de flancos planos con charnela ancha y plana, y con el flanco frontal de mayor pendiente que el del extradós que es más tendido. Posee vergencia hacia el bloque hundido (NO) y el eje con una orientación de  $045^\circ$  (Fig. 12). Si se considera la distancia entre la línea de referencia horizontal

(LRH) establecida en campo y el límite entre la unidad D con el nivel edafizado, esta es en el m 0 de 0.20 m, en el m 2.5 de 0.60 m coincidente con la zona de mayor curvatura de la flexura y en el m 7 concuerda con la LRH. Entre los m 3-4 se reconocen al nivel edafizado plegado con menor longitud de onda que la flexura anticlinal y planos de discontinuidad de escala mesoscópica que inclinan en sentidos opuestos y que corroboran la deformación por distensión en la zona de mayor curvatura de la flexura (Fig. 13a y b).

Se reconocen deformaciones frágiles como grietas de ten-



**Figura 12.** Perfil de la trinchera Chañaritos, donde se indican con línea de trazos la flexura anticlinal. LRH: línea de referencia horizontal y la unidad aflorante es UD: unidad D.

sión, sub-verticales en todo el perfil, de orientación paralela al rumbo de la falla, ubicándose las de mayor expresión entre los m 2-6 (Fig. 14a y b). Estos planos de discontinuidad física afectan tanto el nivel edafizado como la unidad D hasta una profundidad de, al menos, 1.0 m dentro del loess.

Por otra parte, si bien se han relevado deformaciones características de un ambiente compresivo, no se ha logrado visualizar el plano de la falla que las originó.

Se interpreta de acuerdo con la actitud, geometría de las deformaciones dúctiles y frágiles, y a la morfología superficial generada por una pequeña escarpa paralela al rumbo de la falla, que afectan sedimentos holocenos, que éstas responden al empuje generado por una falla de movimiento inverso. Por lo tanto, resulta que las deformaciones son consideradas holocenas y asociadas a la presencia de la falla Las Lagunas.

### Análisis del posible comportamiento de la falla Las Lagunas

La detección de estructuras y morfologías características de este ambiente compresivo y la falta de evidencias confirmando que el plano de la falla Las Lagunas genera ruptura en la superficie, tanto en los tres sitios relevados como en otros revisados anteriormente (Sagripanti y Villalba 2011, Sagripanti et al. 2011), ha conducido a suponer que el posible comportamiento de esta estructura sea el de una falla inversa de bajo ángulo no emergente. Por lo tanto, se decidió realizar un análisis de las deformaciones relevadas en las tres trincheras considerando un contexto más integral que permita, sobre la base de los resultados del mismo, avanzar en el conocimiento sobre el comportamiento de la falla en estudio. Para ello, se han considerado las particularidades y disposición espacial en el perfil de las estructuras, algunos parámetros de la falla, las morfologías superficiales presentes y la profundidad del basamento cristalino en un caso. Además, con el propósito

de poseer un marco de referencia se han tenido en cuenta algunos antecedentes sobre deformaciones cuaternarias en anticlinales y monoclinales en este tipo de ámbito de autores como McCalpin (1997, 2009) y Yeats et al. (1997), entre otros.

**Trinchera Las Lajas:** Analizando de forma integral las deformaciones detectadas en esta trinchera, si se consideran a la geometría monoclin (unidad B) que tiene una propagación que se manifiesta en el contacto de las unidades C y D, junto con la flexura anticlinal en el nivel edafizado con inclinación al SE y los planos de discontinuidad en la unidad A con tendencia a subhorizontalizarse (Fig. 5), éstas se interpretan como evidencias de la deformación interna del bloque colgante de la falla producida tanto por el empuje horizontal como por la componente vertical del mismo que reciben los sedimentos durante el movimiento de una falla inversa.

Por otra parte, el arroyo Las Lajas antes de atravesar el sector donde se ubica la falla Las Lagunas adquiere un diseño meandriforme con mayor ancho de valle, es posible que temporalmente haya sido impedido su normal drenaje generando depósitos aislados de sedimentos de origen palustre y lagunar. Luego de atravesar la zona de falla adquiere localmente un patrón más rectilíneo y un aumento en la disección vertical. En algunos tramos aguas abajo de este sector se reconocen frentes activos de erosión retrocedente.

**Trinchera del Gato:** En el análisis realizado de forma integral se han considerado la distribución espacial de las estructuras relevadas en el sector de mayor deformación del perfil, como la flexura anticlinal del techo de la unidad D, las grietas de tensión sub-verticales rellenas paralelas y oblicuas al rumbo de la falla (Figs. 7 y 8), los pliegues de escala mesoscópica en la unidad E y la ubicación del basamento cristalino en el bloque colgante de la falla que está a una profundidad de 11.0 m, determinado por Sagripanti (2006), con un rechazo aparente de 14.0 m. Además, se ha tenido en cuenta la presencia

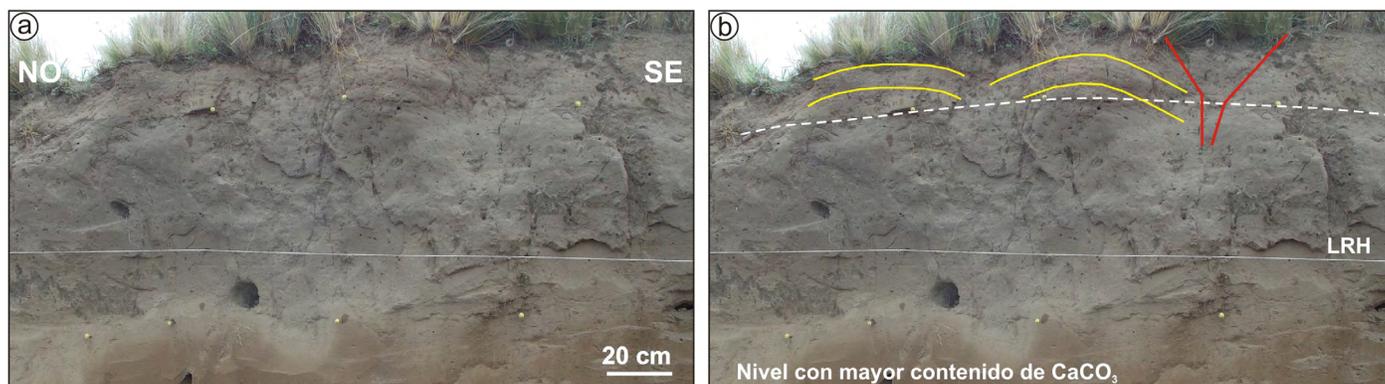
de una escarpa de características y expresión en el relieve poco frecuente en este ámbito posiblemente generada por una distensión localizada y deslizamiento gravitacional que generan fallas normales en el bloque colgante de la falla principal. Se supone que la expresión de esta morfología podría estar vinculada también al patrón de agrupamiento temporal (*clustering*) de fuertes paleoterremotos interpretados para el Holoceno en esta falla (Sagripanti 2006, Sagripanti et al. 2011).

Se interpreta que las deformaciones en este sector podrían resultar del empuje horizontal y vertical que reciben los sedimentos del bloque colgante, producido por una falla inversa superficial de bajo ángulo. Con el propósito de sustentar la interpretación resultante de este análisis se elaboró un esquema de síntesis del sector, representación tridimensional, donde se presenta la distribución espacial de las principales estructuras relevadas (Fig. 15).

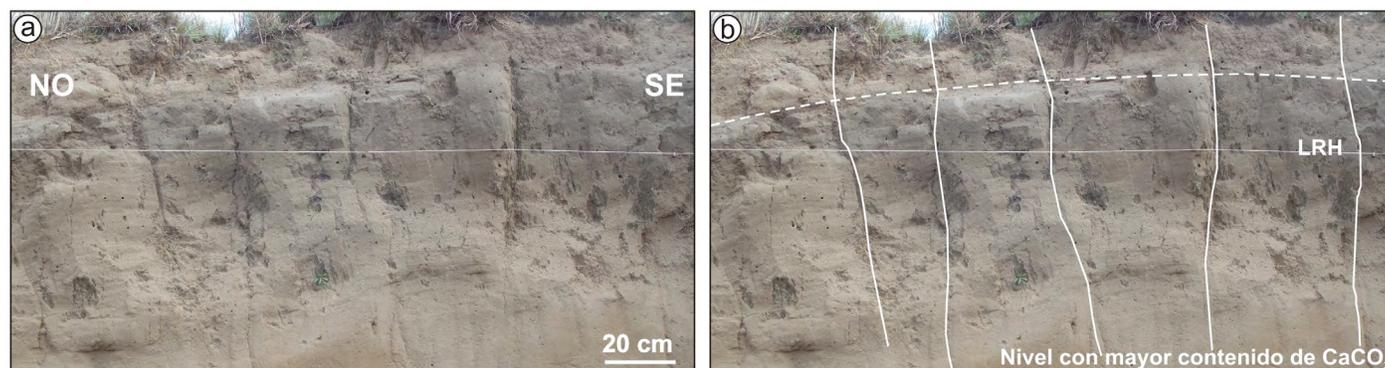
Por otra parte, se supone que la presencia de la escarpa de la falla Las Lagunas en este sector generó una interrupción al escurrimiento superficial del arroyo Achiras-del Gato, facilitando el emplazamiento de una laguna en el bloque hundido, donde se reconocen depósitos lagunares de hasta 1 m de espesor y edad entre 3770 y 1780 años. El arroyo adopta en este sector un diseño meandriforme con lecho aluvial y

mayor ancho de valle, y antes de atravesar la zona de falla se orienta paralelo a la escarpa. Luego de atravesar la misma adquiere localmente un patrón más rectilíneo, menor ancho de valle y un aumento en la disección vertical alcanzando al basamento cristalino. En algunos sectores ubicados aguas abajo de este lugar se reconocen frentes activos de erosión retrocedente.

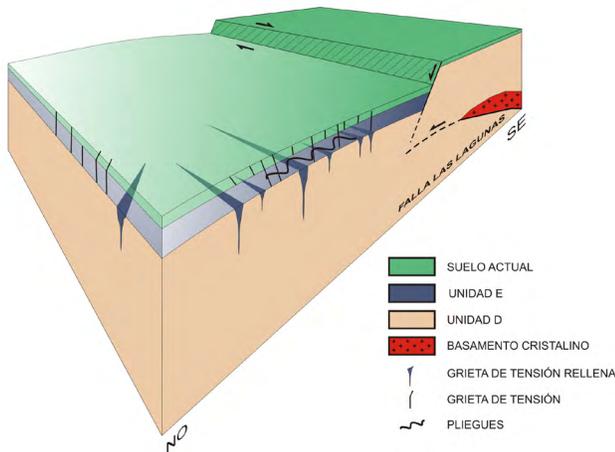
**Trinchera Chañaritos:** El análisis integrado de las estructuras relevadas se realizó teniendo en cuenta su geometría y disposición espacial en el perfil, también se consideraron las pequeñas escarpas presentes en el entorno de la trinchera que corresponderían a flexuras anticlinales o pliegues de reducida longitud de onda y próximos entre ellos, que definen una morfología superficial similar a las escarpas que resultan del empuje generado por fallas superficiales distributivas. Se interpreta que la morfología analizada podría ser resultante del empuje que reciben los sedimentos del bloque colgante por parte de una falla inversa superficial de bajo ángulo. Además, que la misma forma parte de un grupo de pequeñas escarpas alineadas y paralelas (Fig. 11) asociadas a la falla Las Lagunas, que podrían ser generadas por pliegues o flexuras como la descrita. Se considera que esta morfología es similar a una escarpa de pliegue cosísmica.



**Figura 13.** a) Detalle A entre m 2.5-4; b) *sketch* de a), donde se presentan la flexura anticlinal (línea de trazos), pliegues (líneas amarillas) y fracturas (líneas rojas) que inclinan en sentido opuesto y el contacto entre la UD y el nivel edafizado en línea de trazos.



**Figura 14.** a) Detalle B entre m 5-6.5; b) *sketch* de a), donde las grietas de tensión sub-verticales reconocidas están con línea continua y el contacto entre la UD y el nivel edafizado en línea de trazos.



**Figura 15.** Representación tridimensional, sin escala, donde se presenta la disposición espacial de las estructuras relevadas en la trinchera del Gato, de la escarpa y la posición del basamento cristalino en el subsuelo.

## DISCUSIÓN

En el ámbito del piedemonte oriental de la sierra de Comechingones se han relevado distintos tipos de deformaciones cosísmicas, dúctiles y frágiles, en sedimentos no consolidados holocenos, que ponen en evidencia la ocurrencia de fuertes terremotos prehistóricos que podrían haber alcanzado la M 6.9 como lo indican algunos reportes (Sagripanti 2006, Sagripanti et al. 2011). La presencia de estas deformaciones y morfologías holocenas, consideradas típicas para este ámbito, son evidencia de que las estructuras cuaternarias asociadas a las sierras de Comechingones y sierra Chica no están circunscriptas solamente a las escarpas próximas a los frentes de levantamiento serranos y confirman el régimen tectónico compresivo actuante en este sector durante el Holoceno.

Las deformaciones como el plegamiento monoclinial y flexura anticlinal detectadas en una sección de la falla Las Lagunas, propagante en sedimentos, se pueden comparar con algunas estructuras generadas en sedimentos cuaternarios por el empuje de fallas no emergentes citadas por McCalpin (2006). Este autor considera que la expresión morfológica más común en estos ambientes es el plegamiento anticlinal y monoclinial que responden a un mecanismo de deformación de una cuña de empuje. Por lo tanto, se puede asumir que las estructuras relevadas en la trinchera Las Lajas poseen similitud con las resultantes de un mecanismo de empuje asociado a una falla no emergente.

La ocurrencia del fuerte terremoto superficial de Spitak, Armenia, el 7 de diciembre de 1988 de M 6.9 con epicentro en una región continental sometida a un régimen tectónico compresivo, generó numerosas estructuras típicas en depó-

sitos de sedimentos no consolidados a lo largo de la falla y a distintas escalas. Entre estas, deslizamientos gravitacionales que generan fallas normales en el bloque colgante de la falla, flexuras anticlinales, crestas de presión, grietas de tensión detrás del frente de corrimiento y en *echelon* en el bloque colgante que indican una componente de rumbo en el corrimiento (Philip y Meghraoui 1983, Philip et al. 1992, McCalpin 2006).

Las deformaciones reconocidas en la trinchera del Gato, como flexura anticlinal, grietas de tensión rellenas, falla normal, entre otras, se consideran que poseen similitud en el tipo y distribución con las asociadas a una cresta de presión generada por el fuerte terremoto superficial de Spitak. Además, si se consideran las grietas de tensión relevadas de orientación ( $130^\circ$ ), estas forman un ángulo agudo ( $75^\circ$ ) con el rumbo de la falla y cuya ubicación podría ser en un sector de la parte frontal del bloque colgante. Si bien, no se puede precisar la disposición en *echelon* de las mismas, su generación podría estar asociada al desplazamiento de rumbo dextral que posee la falla.

La magnitud determinada para fuertes paleoterremotos con ocurrencia en la zona de estudio y asociados a la falla Las Lagunas es de M 6.9 (Sagripanti 2006, Sagripanti et al. 2011). Si se considera un parámetro sismológico del terremoto de Spitak como la magnitud, la misma fue de M 6.9 (Philip et al. 1992), siendo esta análoga a la asignada a los paleoterremotos de la región. Por lo tanto, la similitud entre algunas características de estos eventos sísmicos permite suponer que las estructuras reconocidas, en sedimentos no consolidados, en la trinchera del Gato resultantes de la actividad paleosísmica tienen semejanza con las presentes en las crestas de presión generadas durante el terremoto mencionado.

Según McCalpin (1996, 2006) en algunos ambientes compresivos donde se generan plegamientos asociados, la longitud de onda de estos está relacionada con la profundidad a la cual la falla transmite el empuje. Si ésta es muy superficial los pliegues generados son lo suficientemente estrechos como para producir pequeñas escarpas similares a las morfologías resultantes de fallas distributivas. Las pequeñas escarpas paralelas, rectilíneas y próximas, morfologías formadas por una sucesión de flexuras anticlinales, presentes en el sector de la trinchera Chañaritos se considera que guardan similitud con las deformaciones asociadas a estructuras compresivas superficiales propuestas por este autor y se vinculan al empuje de una falla de movimiento inverso no emergente.

Se ha constatado que las deformaciones resultantes del empuje de una falla de movimiento inverso propagante en sedimentos cuaternarios como la falla Las Lagunas son de distintos tipos y dimensiones, como también que las de mayor

expresión se ubican en un sector donde la profundidad del basamento cristalino es muy superficial. Esto permite suponer que el desarrollo de las mismas a lo largo del trazo de la falla está en relación con el espesor de los sedimentos no consolidados donde propaga y con la profundidad del basamento cristalino.

Con relación a esta suposición se pueden mencionar apreciaciones de algunos autores, como Costa et al. (2000), quienes plantean que en algunos casos este tipo de fallas, dependiendo de la magnitud de la deformación y de la erosión de la cubierta sedimentaria, pueden tener un comportamiento indistinto, como un corrimiento ciego o como emergente. Por su parte, Meghraoui y Doumaz (1996), consideran que cuando la ruptura no alcanza la superficie genera flexuras o crestas que se manifiestan cuando la topografía es muy suave y los depósitos de sedimentos no consolidados son potentes. Además, asumen que el mecanismo de ruptura o generación de estructuras de un fuerte terremoto puede ser complejo en la superficie y variar de un lugar a otro de acuerdo a la topografía, estructuras preexistentes y posición del basamento.

Las estructuras cosísmicas relevadas por la magnitud de su expresión y distribución, son evidencias de la ocurrencia de fuertes paleoterremotos que se consideran indicadores tectónicos de la actividad de la falla Las Lagunas durante el Holoceno. Con relación a este tipo de evidencias, Meghraoui y Doumaz (1996) sostienen que el plegamiento por desplazamiento flexural, *bending moment fault*, arqueamientos y fallamientos caracteriza el grado de actividad debido al empuje de la falla e ilustra la evolución de la misma y su capacidad para producir futuros fuertes terremotos. Esto implica que cada falla ciega o pliegue activo contiene indicadores tectónicos que evidencian los procesos de fallamiento durante terremotos pasados.

## CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Las características de las deformaciones dúctiles y frágiles presentes en los sedimentos holocenos no consolidados, loessoides y lagunares, relevadas y descritas en las trincheras ubicadas en una sección de unos 15 km de largo sobre el trazo de la falla Las Lagunas, permiten concluir que las mismas son de edad holocena y que estarían asociadas a reactivaciones de la falla en esa época.

Las interpretaciones obtenidas del análisis integral de las estructuras relevadas en la falla Las Lagunas, junto a la si-

litud de estas deformaciones con las detectadas en otros ambientes tectónicos compresivos cuaternarios y a que no se ha logrado identificar el plano de falla principal aflorando en la sección de estudio, permiten concluir que estas deformaciones holocenas han sido generadas por el empuje de una falla inversa superficial de bajo ángulo no emergente propagante en sedimentos loessoides.

Las deformaciones reconocidas en sedimentos no consolidados holocenos, la ausencia de evidencias de ruptura de la falla en superficie y la expresión morfológica superficial en general poco perceptible de esta estructura son similares a las particularidades de otras fallas presentes en esta región, por lo tanto, se considera que estos rasgos distintivos son los característicos para fallas inversas cuaternarias en este ámbito pedemontano.

Los distintos tipos de estructuras cosísmicas holocenas relevadas, que son los indicadores tectónicos de la actividad de la falla, ponen en evidencia la importante capacidad de la falla Las Lagunas para producir fuertes terremotos futuros. Por lo tanto, se considera que el peligro sísmico asociado a esta estructura actualmente está siendo subestimado.

Si bien existen antecedentes sobre estudios geomorfológicos y neotectónicos realizados en el ámbito del piedemonte oriental de la sierra de Comechingones donde se han reportado deformaciones cosísmicas y morfologías superficiales asociadas a reactivaciones de fallas sismogénicas no se ha logrado reportar la ruptura en superficie de alguna de estas fallas. Es por ello que, sobre la base de algunos de los resultados obtenidos que están indicando que el comportamiento de una sección de la falla en estudio es inversa de bajo ángulo y no emergente, se considera que a futuro se deberían adecuar las metodologías para la búsqueda y detección de fallas con supuesta actividad cuaternaria en este ámbito.

## AGRADECIMIENTOS

Al editor temático Dr. Fernando Hongn, a la revisora Dra. Lucía Sagripanti y a la revisora Dra. Carolina Montero por la lectura crítica del manuscrito, observaciones y sugerencias que han permitido mejorar este artículo.

## REFERENCIAS

- Alvarado, P., Castro de Machuca, B. y Beck, S. 2005. Comparative seismic and petrographic crustal study between the Western and Eastern Sierras Pampeanas region (31°S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60(4): 787-796.
- Cantú, M.P. 1992. El Holoceno en la provincia de Córdoba. *Holoceno de la República Argentina*. Cadinqua, 1: 1-16, Paraná.

- Cantú, M., Schiavo, H., Becker, A., Zhou, L. y Grumelli, M. 2006. Pleistoceno superior tardío-Holoceno de la cuenca media del arroyo Santa Catalina, provincia de Córdoba, Argentina. 3º Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas 2: 777-786, Córdoba.
- Carignano, C., Kröhling, D., Degiovanni, D. y Cioccale, M. 2014. Geomorfología. 19º Congreso Geológico Argentino, Relatorio CD: 747-823, Córdoba.
- Costa, C.H. 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino, tectónica cuaternaria en las Sierras Pampeanas. En: Caminos, R. (ed.), Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Anales 29: 779-784.
- Costa, C. y Vita Finzi, C. 1996. Late holocene faulting in the southeast Sierras Pampeanas of Argentina. *Geology* 24(12): 1127-1130.
- Costa, C.H., Machette, M.N., Dart, R., Bastias, H., Paredes, J., Perucca, L., Tello, G. y Haller, K. 2000. Mapa and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. International Lithosphere Program, USGS. Open-file report 00-0108, 81p.
- 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.
- Costa, C., Massabie, A., Sagripanti, G., Brunetto, E. y Coppolecchia, M. 2014. Neotectónica. 19º Congreso Geológico Argentino, Relatorio CD: 725-746, Córdoba.
- Costa, C. H., Owen, L. A., Ricci, W. R., Johnson, W. J. y Halperin A. D. 2018. Holocene activity and seismogenic capability of intraplate thrusts: Insights from the Pampean Ranges, Argentina. *Tectonophysics* 737: 57-70.
- Degiovanni, S., Echeverría, K., Andreazzini, J. y Doffo, N. 2014. Los sistemas fluviales del Sur de Córdoba: alteraciones históricas, procesos de ajuste y consecuencias ambientales. 19º Congreso Geológico Argentino, Simposio Geología del Cuaternario, Geomorfología y cambio climático, actas CD: 13-19, Córdoba.
- Jordan, T. 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., Isacks, B., Allmendinger, R., Bremer, J. y Ramos, V. 1983. Andean Tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate. *Geological Society of America Bulletin* 94: 341-361.
- Kraemer, P., Martino, R., Giambastiani, M. y Sfragulla, J. 1988. Análisis dinámico cinemático preliminar de la falla Santa Rosa, Departamento de Calamuchita, Provincia de Córdoba. 5º Reunión de Microtectónica, Actas 1: 107-114, Córdoba.
- Massabie, A.C. y Szlafsztein, C.F. 1991. Condiciones geomecánicas y edad del fallamiento neotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales, Córdoba, Argentina. *Actas Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería* 6: 154-168.
- Massabie, A., Cegarra, M. y Sanguinetti, A. 2006. Estructura y edad de fallamiento cuaternario a la latitud de Biale Massé, Sierra Chica de Córdoba. En: Hongn, F., Becchio, R. y Seggiaro, R. (eds.), 12º Reunión sobre Microtectónica y Geología Estructural. Asociación Geológica Argentina, Serie D, Publicación Especial 9, 107-112, Buenos Aires.
- McCalpin, J.P. 1996. *Paleoseismology*, Academic Press Inc., 587 p., California.
- McCalpin, J.P. 2009. *Paleoseismology*, Academic Press Inc., 615 p., California.
- Meghraoui, M. y Doumaz, F. 1996. Earthquake-induced flooding and paleoseismicity of the El Asnam, Algeria, fault-related fold. *Journal of Geophysical Research* 101: 17,617-17,644.
- Philip, H. y Meghraoui, M. 1983. Structural analysis and interpretation of the surface deformations of the El Asnam earthquake of October 10, 1980. *Tectonics* 2: 17-49.
- Philip, H., Rogozhin, E., Cisternas, A., Bousquet, J. C., Borisov, B. y Karakhanian, A. 1992. The Armenian earthquake of 1988 December 7: faulting and folding, neotectonics and paleoseismicity. *Geophysical Journal International* 110: 141-158.
- 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. 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino. En: Caminos, R. (ed.), Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico y Minero Argentino, SEGEMAR, Anales 29 (24): 715-784.
- Ramos, V., Cristallini, E. y Pérez, D. 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 59-78.
- Richardson, T., Gilbert, H., Anderson, M. y Ridgway, K. D. 2012. Seismicity within the actively deforming Eastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Geophysics* 188:408-420.
- 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, 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(4): 491-501.
- Sagripanti, G. L., Villalba, D., Bettiol, A. y Seitz, C. 2009. Sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba. Análisis del peligro y riesgo sísmico asociado. *Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* 23: 45-53.
- Sagripanti, G. L., Schiavo, H. F., Felizzia, J., Villalba, D., Aguilera, D., 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. y Villegas, M. 2012. Nuevas evidencias de deformaciones cuaternarias asociadas a la falla Sierra Chica. Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69(4): 624-639.
- Sagripanti, G. L., Villalba, D., Villegas, M., Castaldi, G., Benito, E. y Muratore, N. 2014. Avances en la Valoración del Peligro Sísmico en Fallas con Actividad Cuaternaria. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. *Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* 32: 93-105.
- Sagripanti, G., Villalba, D., Castaldi G., Giménez, M., Aguilera, D. y Giaccardi, A. 2018. Actividad cuaternaria asociada a la falla Las Rosas, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 75(3): 409-424.
- 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.
- Villalba, D. y Sagripanti, G. L. 2014. Análisis morfológico de escarpas asociadas a una falla de intraplaca con actividad cuaternaria: falla Las Lagunas, Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71 (1): 86-95.
- Yeats, R., Sieh, K. y Allen, C. 1997. *The geology of earthquakes*. Oxford university press. 568 p., Oxford.