



# Múltiples reactivaciones tectónicas del sistema de fallas Cachi en el borde oriental del valle de Luracatao sur, valles Calchaquíes, Noroeste Argentino

**Carolina MONTERO-LÓPEZ<sup>1</sup>, Fernando HONGN<sup>1</sup>, Alejandro ARAMAYO<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO), Universidad Nacional de Salta-CONICET, Salta.

Autora principal: Carolina Montero-López, cmontero@conicet.gov.ar

**Editor:** José F. Mescua

Recibido: 15 de marzo de 2022

Aceptado: 4 de julio de 2022

## RESUMEN

El borde oriental del valle de Luracatao (valles Calchaquíes límite con la Puna) está definido por un grupo de fallas que denominamos sistema de fallas Cachi que levantan la sierra de Cachi y cumbres de la Laguna. El sistema se compone de tres fallas, de este a oeste falla oriental, falla central y falla occidental, con rumbo general N-S y buzamiento hacia el este. La falla oriental es la falla normal principal que limita el borde occidental del hemigraben cretácico de Brealito-Molinos. Las fallas central y occidental corresponden a ramificaciones o conexiones de la falla oriental. El conjunto, originado como fallas normales cretácicas, registra múltiples procesos de inversión-reactivación tectónicas durante la orogenia Andina. Se destaca la influencia de las heterogeneidades mecánicas del basamento ígneo-metamórfico sobre la localización de las estructuras mesozoicas y cenozoicas. Las orientaciones de las fábricas del basamento y las fallas son sub-paralelas. En este trabajo se presentan nuevos datos de campo que permiten reconstruir las etapas principales de la historia de este sistema de estructuras, previamente descrito como una única estructura (falla Cachi) y una ramificación localizada. Además, se documentan la inversión eocena y reactivaciones neógeno-cuaternarias.

**Palabras clave:** Inversión de fallas, Tectónica recurrente, Eoceno medio, Cuaternario, Cordillera Oriental.

## ABSTRACT

*Multiple tectonic reactivations of the Cachi fault system at the eastern edge of the southern Luracatao valley, Calchaquíes valleys, northwestern Argentina.*

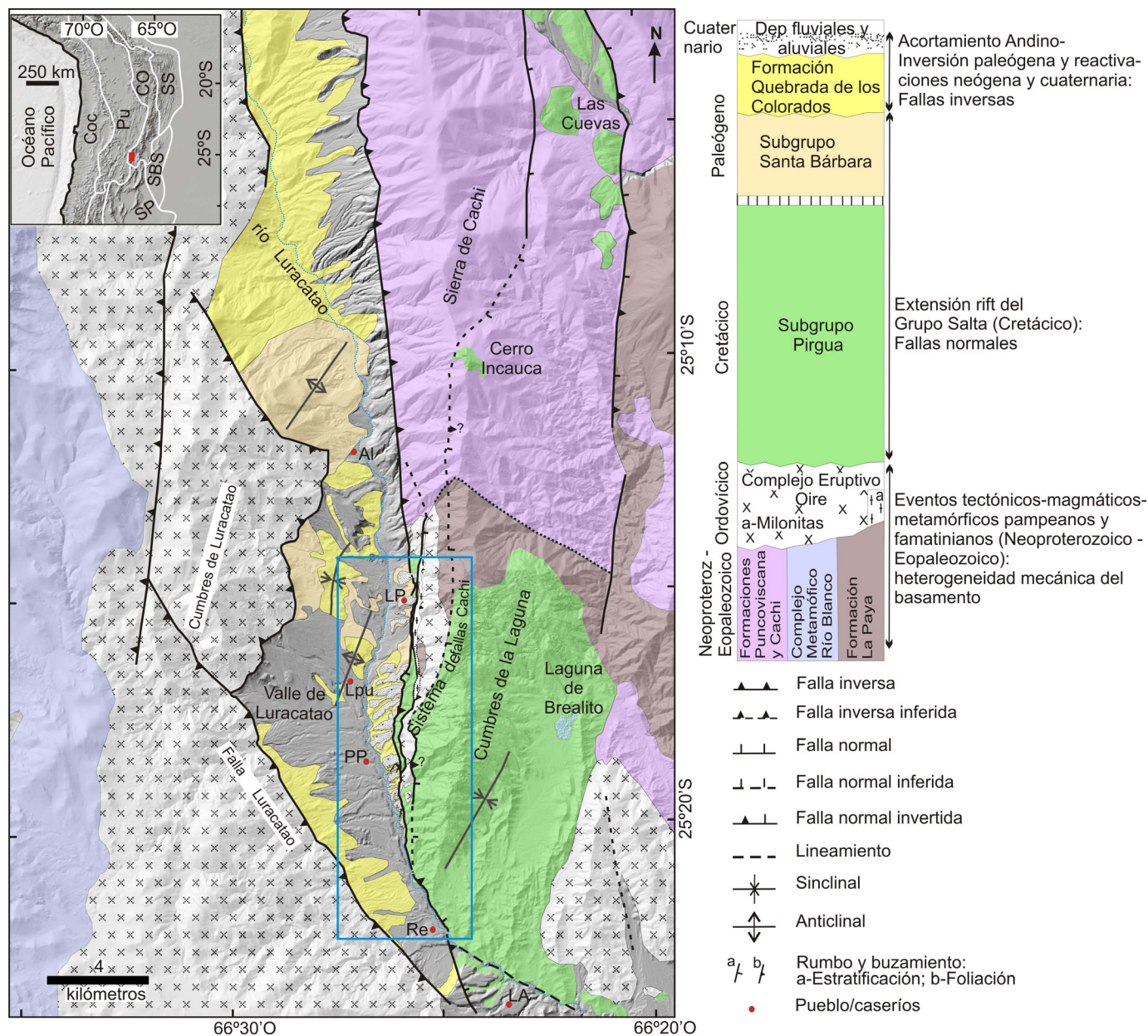
Several faults were identified in the eastern border of the Luracatao valley (the boundary between Calchaquí valleys and Puna) and grouped here in the Cachi fault system, which uplifted the Sierra de Cachi and Cumbres de la Laguna mountain ranges. This system comprises three faults, with roughly N-S orientation and dip to the east, from east to west: eastern fault, central fault, and western fault. The eastern fault corresponds to a main normal fault that bounded the Cretaceous Brealito-Molinos half-graben to the west. Central and western faults, interpreted as splays of the eastern fault, originated as cretaceous normal faults, recording multiple tectonic inversion-reativation processes during the Andean orogeny. The basement heterogeneities have controlled the location of new structures during the Mesozoic and Cenozoic; the orientations of the basement fabrics and faults are subparallel. In this study, we present new field data that help us reconstruct the main stages of this structural system evolution, described in previous works as a unique master fault (Cachi fault) with a localized splay, and document Eocene tectonic inversion and neogene-quaternary reactivations.

**Keywords:** Fault inversion, Recurrent tectonic, Middle Eocene, Quaternary, Eastern Cordillera.

## INTRODUCCIÓN

La configuración de los valles y montañas que forman parte de la Cordillera Oriental en el noroeste de Argentina involucra varios eventos de deformación desde el Neoproterozoico-Paleozoico temprano, entre los cuales se destacan aquellos ocurridos desde tiempos cretácicos, con el desarrollo del rift del Grupo Salta y los posteriores eventos de acortamiento relacionados a la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana durante el Cenozoico (e.g. Grier et al. 1991, Mon y Salfity 1995). Los valles Calchaquíes constitu-

yen una unidad morfoestructural con características particulares que llevó a Salfity (2004) a proponerla como una nueva provincia geológica denominada Calchaquenia. Esta región alberga potentes secuencias sedimentarias paleógenas y neógenas (hasta 7000 m de espesor, Galli et al. 2014) con evidencias claras de deformación que permitieron reconstruir su historia de evolución en un modelo de antepaís con señales de fragmentación desde el Eoceno medio a tardío (Payrola Bosio et al. 2009, del Papa et al. 2013, Aramayo et al. 2017a). Además, existen numerosas estructuras que afectan depósitos de edad cuaternaria y evidencian deformación



**Figura 1.** Mapa geológico regional del valle de Luracatao, borde entre Puna oriental y valles Calchaquíes. Modificado de Hongn y Seggiaro (2001) y Payrola Bosio (2010). El recuadro azul sitúa la zona de estudio (Fig. 2). Coc: Cordillera Occidental; Pu: Puna; CO: Cordillera Oriental; SS: Sierras Subandinas; SSB: Sistema de Santa Bárbara; SP: Sierras Pampeanas. Al: Alumbre; LP: Las Pailas; Lpu: La Puerta; PP: Pata Pampa; Re: Refugio; LA: La Aguadita.

activa (Casa et al. 2014, Yamin et al. 2016, García et al. 2017, Figueroa et al. 2020).

Muchas de las estructuras que generaron la subsidencia mecánica para el emplazamiento y desarrollo del rift cretácico en la región reutilizaron las heterogeneidades del basamento y, durante el acortamiento andino, estas fallas normales fueron invertidas y reactivadas como fuera postulado por diversos autores (e.g. Grier et al. 1991, Hongn y Seggiaro 1998, 2001, Carrera et al. 2006, Hongn et al. 2010). En el borde occidental de la cuenca de rift, los hemigrábenes estaban limitados por fallas normales de dirección N-S a NO-SE (Salfity y Marquillas 1994, Carrera et al. 2006). Este es el caso de una zona localizada entre el borde oriental de la Puna y los valles Calchaquíes donde se emplaza una depresión intermontana elongada en sentido meridional -valle de Luracatao- que constituye el valle más occidental dentro de la región de los valles Calchaquíes (Fig. 1). Las sierras que bordean este valle se encuentran limitadas por dos fallas de primer orden con buzamientos opuestos que levantan el basamento neoproterozoico-paleozoico inferior sobre depósitos continentales del Cretácico y Paleógeno. La exhumación y elevación de estas sierras es producto de eventos de acortamiento tectónico que se iniciaron en el Eoceno medio a tardío (Payrola Bosio et al. 2009) y continúan hasta el Cuaternario.

El borde oriental de la porción austral del valle de Luracatao está limitado por un sistema de fallas que generalmente se denomina como falla Cachi (Payrola Bosio et al. 2009) o Cuchiyaco (Hongn y Seggiaro 2001), y se extiende por más de 70 km con una dirección N-S dominante y buzamiento hacia el este, que cambia de orientación hacia el NNO-SSE en su extremo sur (Fig. 1). Corresponde a una falla normal del rift cretácico que después de su inversión inicial registra etapas de reactivación durante la orogenia Andina (Hongn y Seggiaro 2001, Carrera et al. 2006, Carrera y Muñoz 2013). Las investigaciones previas han detectado las principales etapas de la larga y compleja historia de esta falla (e.g. Turner 1964, Hongn y Seggiaro 1998, 2001, Carrera et al. 2006, Payrola Bosio 2010, Santimano y Riller 2012, Aramayo 2019) aunque siempre se describió como una estructura simple con escasas ramificaciones. El análisis detallado de la estructura (Hongn y Seggiaro 1998, Santimano 2010, Santimano y Riller 2012) destaca las fábricas del basamento que generaron heterogeneidades, las cuales fueron parcialmente reactivadas durante cada etapa de deformación, desde las cretácicas de movimiento normal y los múltiples movimientos cenozoicos inversos con componentes menores de deslizamiento de rumbo, hasta las últimas de reactivación durante el Cuaternario. De esta forma, esta estructura de primer orden (Turner 1964, Hongn y Seggiaro 2001) registra una parte importante

de las deformaciones cretácicas y cenozoicas que se identifican a partir de la investigación estratigráfica y estructural de la región Calchaquí.

Los trabajos previos en el área de estudio, tanto estratigráficos como estructurales, centraron el foco de atención en la estratigrafía y evolución tectónica cretácico-paleógenas de este sector de borde entre la Puna y la Cordillera Oriental. Si bien varios autores indicaron la actividad de la falla Cachi desde sus inicios en el Cretácico como falla del rift extensional y su posterior inversión cenozoica, el análisis detallado de estas estructuras revela una extensa historia en la que participan procesos de retrabajo y reactivación tectónica (Holdsworth et al. 2001).

Las nuevas observaciones de campo que se presentan en este trabajo permiten mejorar la expresión cartográfica de una estructura o sistema estructural que se menciona repetidamente en la literatura, pero cuya representación gráfica es básicamente la de Hongn y Seggiaro (2001). Adicionalmente, y más importante aún es el hecho de que este sistema estructural puede considerarse un caso de estudio para las hipótesis que proponen actividad tectónica múltiple en estructuras que archivan extensas historias de deformación. El análisis de estas estructuras con registro multiepisódico aporta a la discusión sobre modelos de evolución tectosedimentaria desde el Eoceno medio en el trasarco de los Andes entre los 24° y 27°S; unos proponen una migración temporal y espacial regular de la deformación hacia el antepaís (Galli y Hernández 1999, Carrapa y DeCelles 2008, DeCelles et al. 2011, Siks y Horton 2011) mientras que otros postulan una distribución espacialmente irregular de la actividad tectónica durante la propagación de la deformación en dirección al antepaís (Coutand et al. 2001, Hongn et al. 2007, Payrola Bosio et al. 2009, Strecker et al. 2012, del Papa et al. 2013, Aramayo et al. 2017a, Montero-López et al. 2018, 2021). Entendemos por migración el avance de la deformación hacia el antepaís que deja zonas inactivas o escasamente activas en las áreas por detrás del frente, y por propagación el avance de la deformación hacia el antepaís pero que se mantiene activa en las zonas posteriores o internas.

## GEOLOGÍA LOCAL

El valle de Luracatao (Fig. 1), emplazado en el borde occidental de la Cordillera Oriental, limita al oeste con la Puna. El basamento de la región está compuesto por unidades de edad neoproterozoica a paleozoica temprana que constituyen el núcleo de las sierras que lo bordean, al oeste las cumbres de Luracatao y al este las cumbres de la Laguna y la sierra



de Cachi (Turner 1964). Se compone de rocas metasedimentarias de bajo a alto grado metamórfico que se asignan a las Formaciones Puncoviscana (Turner 1960), La Paya (Aceñola et al. 1976) y Complejo metamórfico Río Blanco (Castillo y Suárez 1989), las cuales constituyen la roca de caja de intrusiones graníticas de la Formación Cachi (trondjemitas, granitos y granodioritas, Turner 1961) y de la Faja Eruptiva de la Puna Oriental (Méndez et al. 1973) o Complejo eruptivo Oire (granitos, granodioritas, gabros, dioritas, aplitas y pegmatitas, Blasco y Zappettini 1995), con edades principalmente ordovícicas (véase síntesis en Suzaño et al. 2017). Las rocas con texturas porfíricas definidas por cristales de feldespato de varios centímetros de longitud son típicas del Complejo eruptivo Oire. Las fábricas del basamento registran el retrabajo de la orogenia famatiniana sobre unidades metamórficas e ígneas pampeanas y famatinianas (Holdsworth et al. 2001), resultando en una serie de heterogeneidades (foliaciones y alternancias litológicas a diferentes escalas) que muestran orientaciones en general coincidentes con la del edificio andino (Hongn et al. 1996, 2010, Hongn y Mon 1999, Finch et al. 2015, Larrovere et al. 2017, entre otros).

En el Cretácico se depositaron las rocas del sinrift del Subgrupo Pirgua (Grupo Salta, Turner 1960), el cual se compone principalmente de depósitos clásticos continentales de color rojizo que alcanzan un espesor de 3700 m en la zona de la laguna de Brealito (Sabino 2004), inmediatamente al este del valle de Luracatao, y que representan los primeros estadios de apertura del rift. Los depósitos muestran variaciones faciales verticales y laterales bien definidas, las brechas y conglomerados son dominantes en los afloramientos contiguos a la falla Cachi, hacia el este gradan a areniscas de grano fino y limolitas con espesores parciales de 1240 m en las secciones próximas a la charnela del sinclinal (Sabino 2002, 2004). Estas variaciones faciales inclusive se advierten mediante el análisis expeditivo de imágenes de satélite en Google Earth, las litologías más finas con la estratificación notable se reconocen en secciones que corresponden a las zonas de charnela y flanco oriental del sinclinal. Secuencia arriba le siguen los depósitos de postrift paleógeno del Subgrupo Santa Bárbara compuestos por sedimentitas continentales fluviales. Cubriendo en discordancia a todas las unidades infrayacentes se disponen los depósitos continentales de antepaís de la base del Grupo Payogastilla, asignados a la Formación Quebrada de los Colorados (Díaz y Malizzia 1983) del Eoceno medio-Oligoceno superior (Payrola Bosio et al. 2009). Afloramientos aislados de areniscas y areniscas conglomerádicas asignados tentativamente a la Formación Angastaco (Grupo Payogastilla, Oligoceno superior-Mioceno) afloran en el sector sudoeste del valle (Payrola Bosio 2010). Por último,

la columna estratigráfica culmina con depósitos de abanicos aluviales y fluviales del Cuaternario (Hongn y Seggiaro 2001).

El valle está limitado por dos fallas de primer orden (Turner 1964) que elevan el basamento sobre las unidades cretácicas y cenozoicas. En el borde occidental, la falla Luracatao pone en contacto los granitoides ordovícicos del Complejo eruptivo Oire sobre las sedimentitas paleógenas del Subgrupo Santa Bárbara y de la Formación Quebrada de los Colorados (Payrola Bosio et al. 2009). En este sector se describen discordancias progresivas en los depósitos eocenos que demuestran la actividad sinsedimentaria de la falla Luracatao. El borde oriental del valle está surcado por la falla Cachi, que sobrepone al basamento ígneo-metamórfico sobre los depósitos cretácicos del Subgrupo Pirgua y eocenos de la Formación Quebrada de los Colorados (Hongn y Seggiaro 2001, Payrola Bosio et al. 2009).

En el centro del valle se desarrollan tres pliegues de primer orden con una orientación oblicua NE-SO, cuyos núcleos contienen unidades paleógenas, y están suavemente inclinados hacia el sur (Payrola Bosio et al. 2009). En los flancos de los sinclinales quedan expuestas las superficies erosivas y discordancia angular entre las sedimentitas paleógenas de la Formación Quebrada de Los Colorados y las areniscas y pelitas del Subgrupo Santa Bárbara subyacente, con exposiciones cuya geometría define estratos de crecimiento (Payrola Bosio et al. 2009).

La depresión topográfica que conforma el valle, se extiende por aproximadamente 70 km en dirección norte-sur, cuyas cotas en su cabecera norte superan los 4500 m s.n.m. y las de su extremo sur son del orden de 2500 m s.n.m. (Fig. 1). A lo largo del valle se observan variaciones en su morfología y simetría, son habituales las diferencias de altitud transversales de hasta 1500-2000 m entre su piso y los cordones que lo circundan, mostrando en general un perfil asimétrico con pendientes más cortas y abruptas en su borde oriental.

## METODOLOGÍA

La metodología empleada es la clásica para el análisis estructural (relevamiento de superficies y líneas de origen tectónico); los datos fueron tomados con brújula. Rumbo y buzamiento se utiliza para describir orientación de superficies y dirección e inclinación para líneas. Los valores de rumbo y dirección de las estructuras fueron corregidos con la declinación magnética correspondiente al área de estudio (aproximadamente 7° O). Los datos se volcaron en un mapa geológico de detalle (Fig. 2) y sobre éste se trazaron tres perfiles estructurales en las zonas accesibles que presentan las

mejores exposiciones de las fallas y relaciones de contacto entre las unidades, de sur a norte: a- Refugio, b- Pata Pampa y c- Las Pailas (Figs. 2, 3a, 4a y 5a). El análisis de la orientación de superficies (plano de falla, planos de estratificación y foliaciones) se llevó a cabo con Stereonet 11 (Allmendinger et al. 2012, Cardozo y Allmendinger 2013) y el cinemático a partir de los datos de fallas menores se procesó con FaultKin 8 (Marrett y Allmendinger 1990, Allmendinger et al. 2012).

En el sector norte Las Pailas, donde la escarpa de la falla Cachi tiene mejor expresión topográfica, se relevó una transecta orientada E-O con una longitud total de 690 m, con un GPS diferencial que cuenta con receptores GNSS de alta precisión, modelo SP60 de la marca *Spectra Precision*, con conexión a diversas constelaciones de satélites (GPS, GLO-NASS, BeiDou y GALILEO) lo que permite obtener soluciones en tiempo real (RTK). Se midieron 75 puntos a lo largo de la transecta, en una equidistancia de 15 m aproximadamente; los datos se procesaron con el software *Spectra Precision Survey Office* (licencia IBIGEO). Además, se generó una base cartográfica de alta resolución mediante el revelamiento fotogramétrico-cartográfico, a través de un Vehículo Aéreo No Tripulado (DJI, modelo *Phantom 4 Pro*). La información obtenida (fotografías aéreas) fue procesada con el software PIX 4D (licencia IBIGEO), obteniéndose un ortomosaico georeferenciado y un modelo digital de elevación de 8 cm de resolución espacial.

## SISTEMA DE FALLAS CACHI

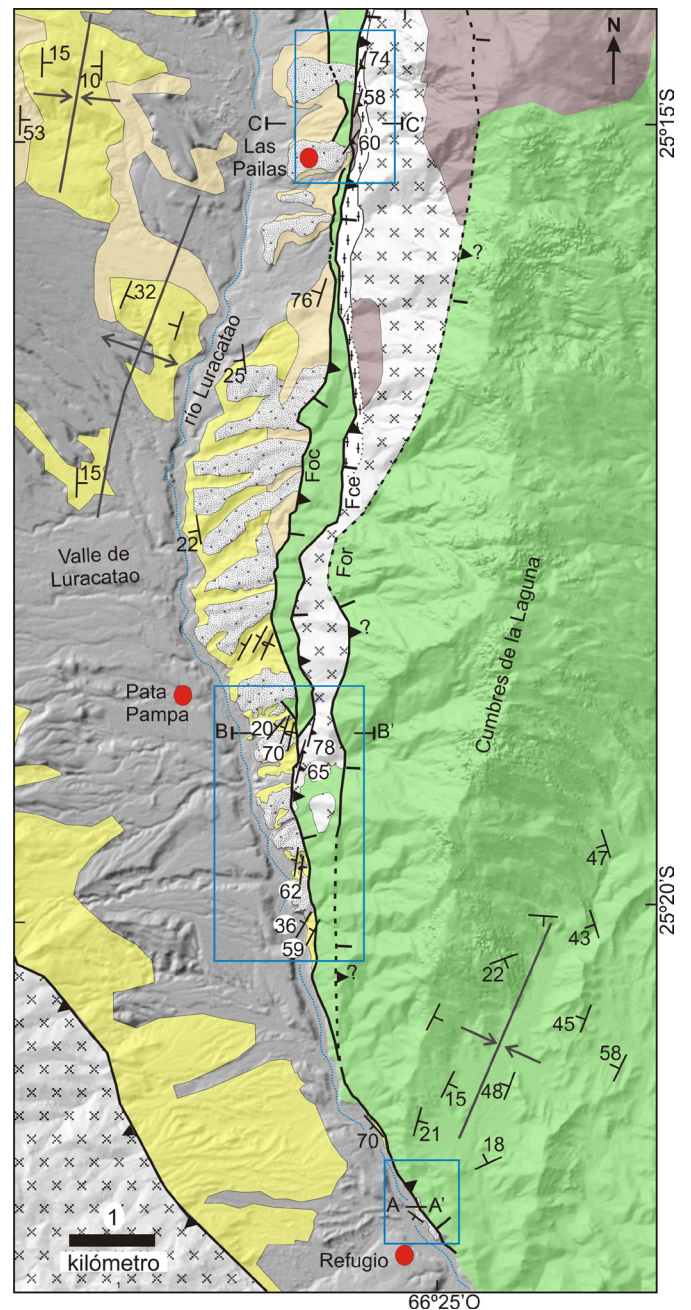
A partir de esta sección se refiere a las fallas oriental, central y occidental como partes del sistema de fallas Cachi. Los datos de campo recolectados en la parte sur de este sistema (Fig. 2) muestran diferentes características a lo largo del rumbo. En la zona más austral de Refugio se identificaron estructuras en una franja estrecha de aproximadamente 100 m de ancho y hacia el norte una serie de ramificaciones que alcanzan su mejor expresión en la zona de Pata Pampa, donde se distribuyen en una franja de 1 km de ancho. Por esta razón, se describen tres sectores, de sur a norte: a- Refugio; b- Pata Pampa y c- Las Pailas (Fig. 2).

### A-sector Refugio

El Subgrupo Pirgua, que constituye el núcleo de las cumbrones de la Laguna, está representado por conglomerados basales compuestos por bloques y guijarros de granito porfídico de color rojo oscuro, con una participación subordinada de metamorfitas, y es montado por el sistema de fallas Cachi sobre las areniscas gruesas a guijarrosas de la Formación

Quebrada de los Colorados (Fig. 3a). El plano de falla de rumbo NNO buza  $62^\circ$  hacia el este-noreste y desarrolla una zona brechada de aproximadamente 50 cm de espesor.

A la altura del puente sobre el río Luracatao (coordenadas centrales  $25.36^\circ$  S -  $66.42^\circ$  O), se observan afloramientos de conglomerado con espesor entre 15 y 20 m, se acuñan hacia el este y buzan ligeramente ( $5-10^\circ$ ) hacia el oeste (Fig. 3a y b). El depósito está compuesto por 90-95 % de bloques de granitoides, con un diámetro máximo de hasta 1.5 m, que



**Figura 2.** Mapa geológico del tramo centro y sur del valle de Luracatao donde se indican los sectores estudiados en detalle. Los recuadros azules muestran los sectores de estudio. Las referencias se indican en la figura 1.

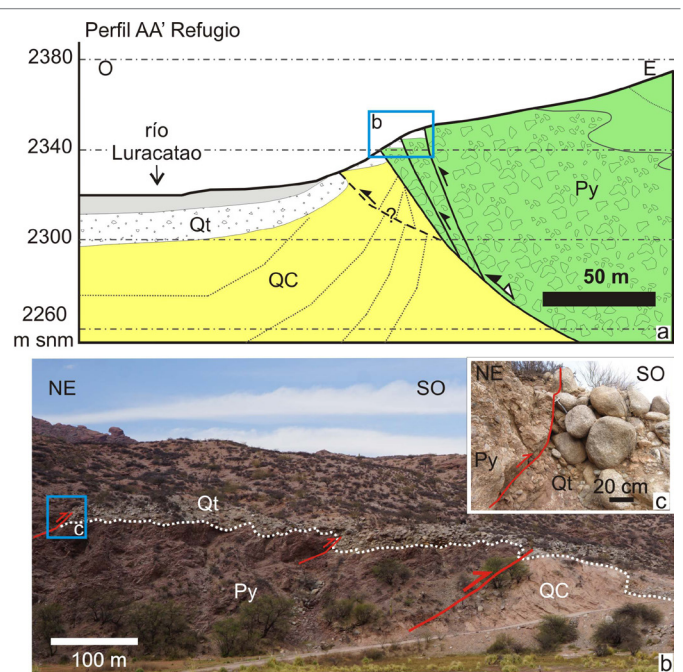
corresponden a granitoides porfíricos biotíticos grises a blanquecinos con fenocristales de feldespatos potásico de hasta diez centímetros de longitud englobados en una matriz de grano grueso, procedentes del Complejo eruptivo Oire que aflora sobre la margen occidental del valle. Este depósito conglomerádico cubre en discordancia al Subgrupo Pirgúa y a la Formación Quebrada de los Colorados, y se asigna al Cuaternario (Nivel de agradación Q2 sensu Aramayo 2019). Estos niveles están desplazados por ramificaciones del sistema de fallas Cachi (Fig. 3b) con buzamientos que varían entre  $55^\circ$  y  $75^\circ$  hacia el NE (Fig. 3c). La base de estos conglomerados cuaternarios está a diferentes alturas (Fig. 3b), y se interpreta esta variación como resultado del desplazamiento asociado a las fallas, con rechazos verticales de aproximadamente 10 m.

El desplazamiento inverso acumulado sobre la falla principal se estima en aproximadamente 1000 m. Considerando que los mayores espesores del Subgrupo Pirgúa medidos en la zona (ca. 3500 m, Sabino 2004, Carrera et al. 2006) se encuentran sobre el flanco occidental del sinclinal de Brealito y próximos a la falla del borde del hemigraben, el desplazamiento inverso no alcanzó a compensar el movimiento de la falla normal dado que en este sector no aflora el basamento. Sin embargo, el desplazamiento fue suficiente para superponer las facies de sinrift sobre la Formación Quebrada de los Colorados, cuya potencia medida en el valle es de aproximadamente 450 m (Payrola Bosio et al. 2009), sin descartar que por debajo estén preservadas las facies postrift del Grupo Salta (Subgrupo Santa Bárbara) como ocurre más al norte. Pocos kilómetros hacia el sur, Carrera et al. (2006) presentan una sección estructural en la que acomodan desplazamientos inversos superiores a 1000 m sobre atajos vinculados con esta falla.

## B-sector Pata Pampa

La sección de Pata Pampa muestra al menos tres estructuras (fallas Cachi oriental, central y occidental) bien definidas, dos de ellas con desplazamientos inversos mínimos acumulados de 100 a 500 m de acuerdo con los espesores expuestos del Subgrupo Pirgúa y la Formación Quebrada de los Colorados (Fig. 4). Para su descripción dividimos al área en Pata Pampa norte y Pata Pampa sur.

En el sector Pata Pampa norte (coordenadas centrales  $25.31^\circ$  S -  $66.43^\circ$  O), hacia las partes más internas de las cumbres de la Laguna, se observó el contacto por falla normal entre las brechas conglomerádicas del Subgrupo Pirgúa y el basamento plutónico constituido por granitos porfíricos rojizos (Fig. 2). En este sector la falla Cachi oriental no presenta evidencias claras de inversión, si existió fue parcial y no alcanzó a compensar el movimiento directo de la falla dado que en el



**Figura 3.** a) Perfil estructural de la sección Refugio donde se observa una única falla; b) Vista hacia el ESE de las cuñas del conglomerado cuaternario afectado por fallas menores. El sistema de fallas Cachi levanta el Subgrupo Pirgúa (Py) sobre la Formación Quebrada de los Colorados (QC) y sobre los depósitos cuaternarios (Qt); c) Vista en detalle de una de las fallas menores que afectan al Cuaternario.

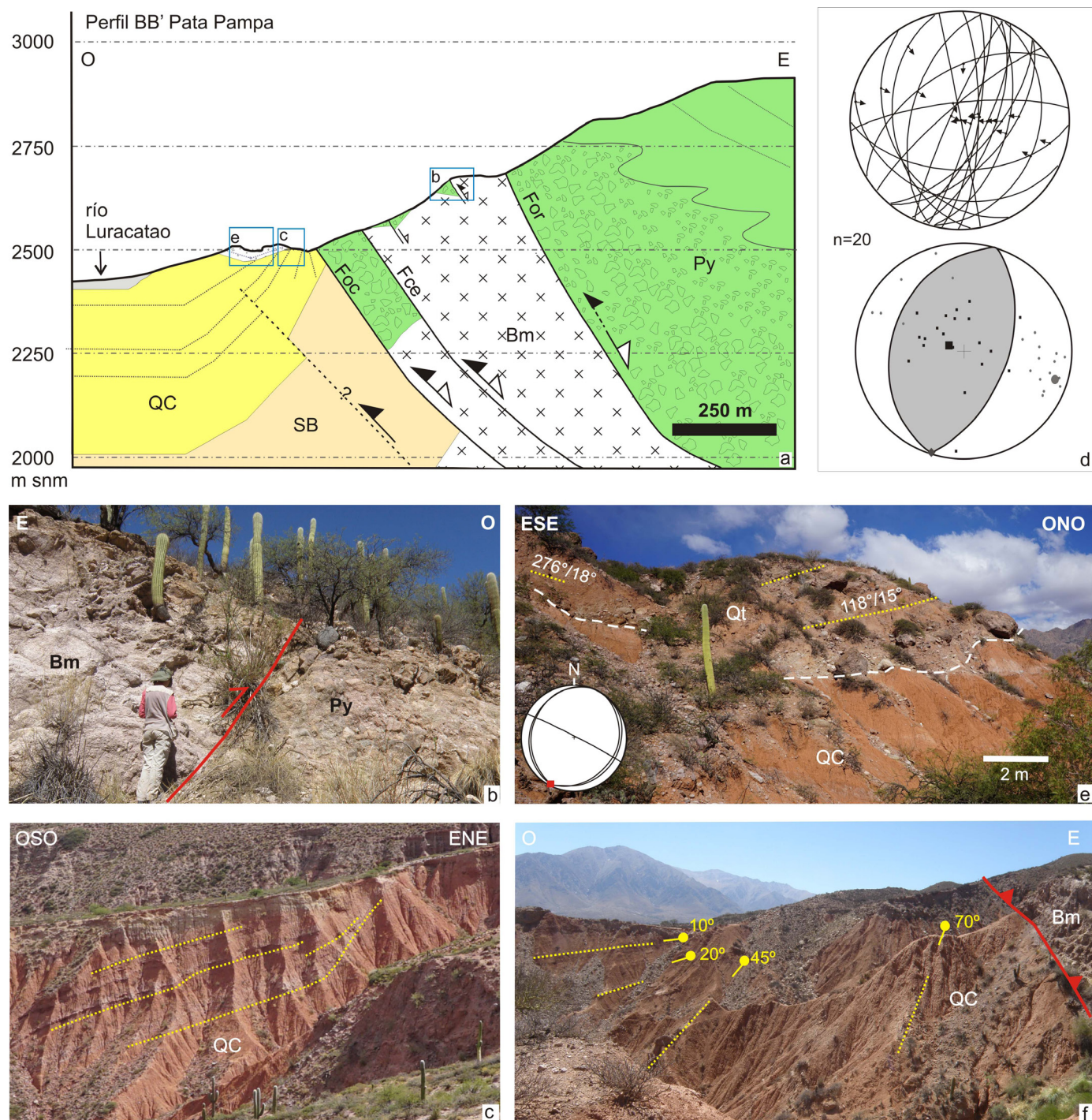
bloque oriental hundido no queda expuesto el basamento y se preservan los mayores espesores de la facies sinrift (Fig. 4).

Siguiendo hacia el oeste, la falla Cachi central sobrepone el basamento granítico sobre el Subgrupo Pirgúa (Fig. 4a). El plano de falla buza  $60^\circ$  hacia el ESE. El bloque de basamento limitado por las fallas Cachi oriental y central expone de forma irregular la base del Subgrupo Pirgúa como lo indican parches de conglomerados y brechas de escaso espesor apoyados sobre los granitos. En este bloque de basamento existen fallas normales menores con inversión tectónica que se preservan a escala de afloramientos (Fig. 4b) lo que se interpreta como relaciones similares a las de las estructuras con mayor desplazamiento.

La falla Cachi occidental sobrepone al Subgrupo Pirgúa sobre la Formación Quebrada de los Colorados, la cual forma un pliegue de arrastre (*normal drag fold* sensu Grasemann et al. 2005) cercano al plano de falla. Hacia el oeste de la falla, los estratos de la Formación Quebrada de los Colorados disminuyen su buzamiento y espesor secuencia arriba formando una geometría de cuña (Fig. 4c).

A su vez, la Formación Quebrada de los Colorados es cubierta en discordancia angular por un depósito de conglomerado medio a grueso basal, que grada a una arenisca conglomerádica hacia la parte superior, de presumible edad cuaternaria. Este depósito se encuentra plegado en un sinclinal



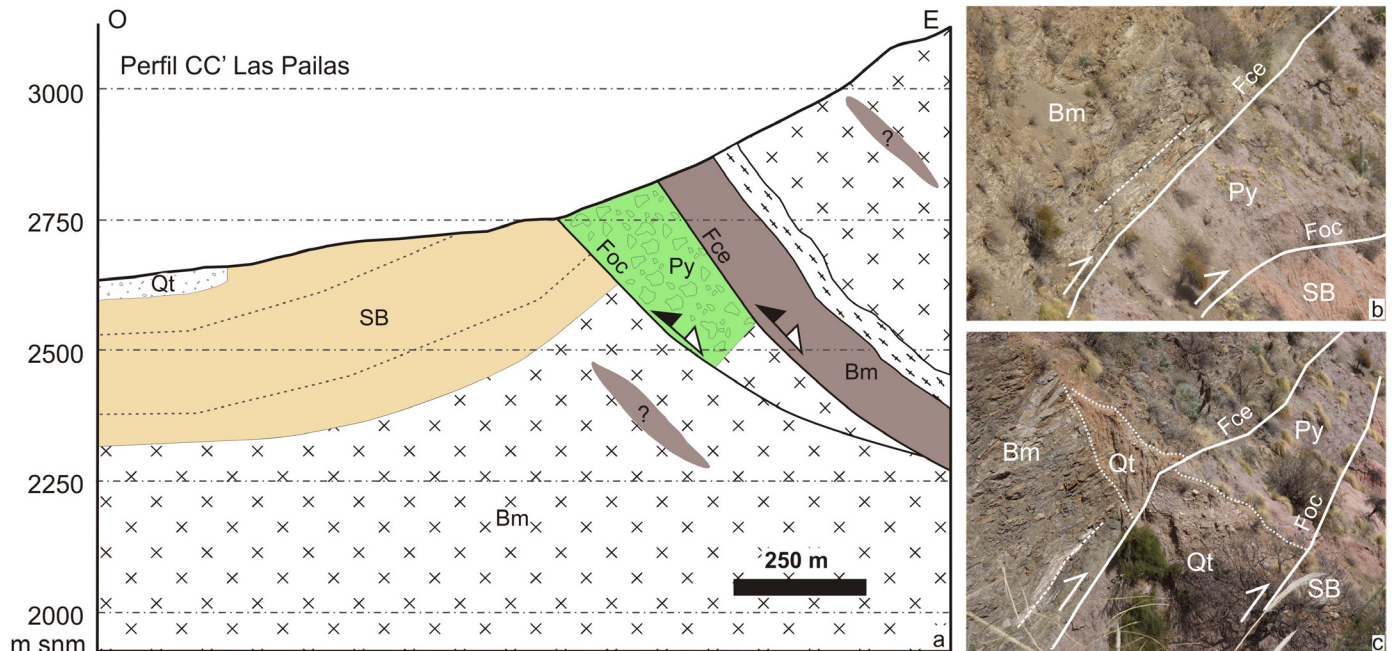


**Figura 4.** a) Perfil estructural de la sección Pata Pampa donde se observa las fallas Cachi oriental (For), central (Fce) y occidental (Foc); b) Cuñas de conglomerados sinrift de escaso espesor (Py), que son montadas por basamento granítico (Bm) a través de una falla invertida. Se interpreta que este ejemplo a escala de afloramiento reproduce las relaciones -a menor escala- que muestra la falla Cachi central en el perfil; c) Vista de la geometría de cuña que definen las capas de la Formación Quebrada de los Colorados (QC); d) Diagramas estereográficos que muestran la orientación de las fallas menores medidas en el basamento y sus estrías asociadas (arriba) y la solución cinemática donde se muestran los ejes principales de deformación, indicando un campo de acortamiento horizontal ONO-ESE; e) Vista hacia el sur del sinclinal que afecta a los depósitos cuaternario (Qt), que cubre en discordancia a los sedimentos eocenos. El diagrama estereográfico muestra la disposición subhorizontal de la línea axial del sinclinal (polo  $\pi$ ) y sus flancos. Los valores de orientación de las capas expresan dirección de buzamiento y buzamiento; f) Vista hacia el noroeste del abanico de capas de la Formación Quebrada de los Colorados en cercanías a la falla Cachi occidental.

asimétrico cuyo eje axial tiene una orientación aproximada NE-SO (Fig. 4e), con buzamientos suaves de sus flancos entre 18° hacia el ONO y 15° hacia el ESE.

En la parte sur de Pata Pampa norte las fallas Cachi central y occidental se unen en una sola, corriendo al basamento directamente sobre la Formación Quebrada de los Colorados





**Figura 5.** a) Perfil estructural de la sección Las Pailas donde se observa las fallas Cachi central (Fce) y occidental (Foc); b) Vista hacia el sur de la falla Cachi central que monta basamento (Bm) sobre facies sinrift (Py). Obsérvese la fábrica de basamento subparalela a la falla. Hacia el borde inferior derecho de la foto se observa la falla occidental que yuxtapone al Subgrupo Pirgua sobre el Subgrupo Santa Bárbara (SB); c) Depósitos conglomeráticos cuaternarios (Qt) de escaso desarrollo afectados por la falla Cachi central.

(Fig. 2). En el basamento plutónico se preservan fallas menores con indicadores de dirección y movimiento (principalmente escalones vinculados a fracturas PT, Petit 1987) que son coherentes con el desplazamiento inverso indicado por las relaciones estratigráficas, cuya solución cinemática arroja un campo de acortamiento en dirección ONO-ESE y una extensión subvertical (Fig. 4d). Las capas de la Formación Quebrada de los Colorados se encuentran invertidas inmediatas a la zona de falla; hacia el oeste, retoman su posición normal y el buzamiento decrece gradualmente (desde aproximadamente  $70^\circ$  a  $10^\circ$  al ONO) describiendo un abanico de capas, rasgo además asociado a estratos de crecimiento (Fig. 4f).

En el área Pata Pampa sur (coordenadas centrales  $25.33^\circ$  S -  $66.43^\circ$  O), se observa una única estructura de rumbo meridiano y buzamiento  $58^\circ$  E que resulta de la unión de las fallas Cachi central y occidental, y en este sector sobrepone al Subgrupo Pirgua sobre la Formación Quebrada de los Colorados (Fig. 2), cuyas capas cercanas a la falla se hallan rebatidas con valores de  $60^\circ$  E. A partir de estas relaciones, y de las expuestas más al norte, se interpreta que la falla Cachi occidental es una ramificación de la central dado que esta última muestra mayor continuidad hacia el norte y hacia el sur. Aquí también el buzamiento de los estratos de la Formación Quebrada de los Colorados decrece gradualmente hacia el oeste con valores que van desde  $70^\circ$  O a  $45^\circ$  O en solo 160 m de distancia desde la falla. Ambas unidades son cubiertas en discordancia por un depósito de conglomerado muy

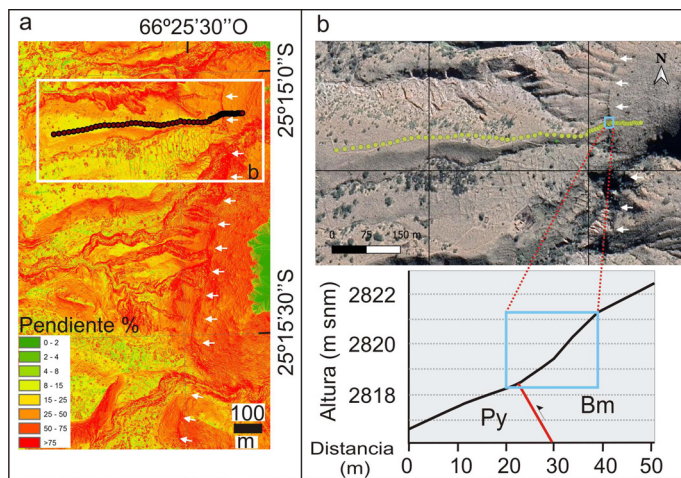
grosso cuaternario que, a su vez, se halla cortado por la falla como también fuera indicado por Santimano y Riller (2012). En el sector próximo a la superficie de falla se observa que el conglomerado exhibe orientación de los clastos y un pliegue de arrastre (*normal drag fold* sensu Grasemann et al. 2005). En esta zona el plano de falla buza entre  $50^\circ$  y  $58^\circ$  hacia el E. Sobre la traza de falla, se encuentran depósitos de travertinos indicando la surgencia de aguas termales, como ya fuera indicado por otros autores en otros tramos de la estructura (Payrola Bosio 2010, Aramayo 2019). Las observaciones sobre la falla dirigidas a determinar indicadores vinculados con las diferentes etapas de movimientos normales e inversos no ofrecieron resultados confiables, las relaciones estratigráficas constituyen la evidencia más nítida de las principales componentes de movimiento y de su cronología relativa.

### C-sector Las Pailas

La sección de Las Pailas (coordenadas centrales  $25.25^\circ$  S -  $66.43^\circ$  O, Fig. 2) muestra dos fallas bien definidas correspondientes a las fallas Cachi central y occidental (Fig. 5a); la oriental debería encontrarse varios kilómetros más al este en el núcleo de las cumbres de la Laguna, sin embargo, no fue posible acceder hasta esta estructura.

La falla Cachi central tiene una marcada expresión topográfica en esta zona con una escarpa sobresaliente tanto en el campo como en imágenes de satélite y modelos de elevación digital por una distancia de aproximadamente 2.5 km





**Figura 6.** a) Mapa de pendientes generado a partir de un modelo digital de elevación de 8 cm de resolución donde se observa la escarpa de falla (flechas blancas); b) Perfil topográfico O-E relevado con GPS diferencial donde se muestra en detalle la zona de la escarpa de falla con un resalto de ~3 m.

(Figs. 6 y 7a). Es una escarpa residual (Stewart y Hancock 1990) en la que la cara libre fue modificada por los agentes de erosión. Los datos obtenidos del perfil topográfico relevado con GPS diferencial y el modelo digital de elevación construido con el vuelo del dron, muestran una topografía suavemente convexa con una pendiente promedio de aproximadamente 20.45 %, con segmentos que varían entre 8-15 % a >75 % (Fig. 6a). En la zona de la escarpa de falla el resalto es de 3 m (Fig. 6b), alcanzando en otros sectores hasta 5 m, y una pendiente de 59 % (30.8°). El valor de la pendiente de acuerdo a la clasificación de Wallace (1977) corresponde a una escarpa controlada por lavado y detritos en un lapso de tiempo de 10 a 50 ka (Bull 2007). La cobertura cuaternaria es escasa en la parte de la falla donde la escarpa alcanza mejor definición. Pocos metros hacia el sur, en una quebrada que drena la ladera oriental del valle, se observan niveles cuaternarios afectados por la falla (Fig. 5c). Esta observación más la escarpa bien preservada evidencian la actividad cuaternaria de la estructura.

En este sector, la superficie de falla es de rumbo N10°E y buza entre 46° y 55° hacia el ESE, llevando el basamento ígneo-metamórfico sobre los conglomerados del Subgrupo Pigua. En la zona de falla, se observa un espesor de aproximadamente 2 m de rocas metamórficas de color gris-verdoso, que constituyen la roca de caja de granitos rosados (Fig. 7b y c). Los granitos están deformados y desarrollan una foliación penetrativa definida por la orientación de micas (principalmente biotita), cuarzo estirado y fenocristales de feldespato que se orientan paralelos a la foliación por rotación. Localmente se distinguen fajas miloníticas con diseños anastomosados a varias escalas, desde pocos centímetros hasta decenas de

metros, donde la foliación y la lineación adquieren mejor definición; la lineación se dispone próxima a la dirección de buzamiento de la foliación que muestra rumbo NNE-SSO a NE-SO y buzamientos dominantes entre 40° y 60° hacia el ESE-SE. Además, hay diques aplíticos de 1 a 10 cm de potencia que se disponen paralelos a la foliación y al contacto entre los granitos deformados y su roca de caja, conjunto que refleja la estructura del basamento a escala regional como resultado de los procesos magmáticos y tectonometamórficos del Paleozoico temprano, fundamentalmente durante el Ordovícico, y que define una heterogeneidad mecánica cuya orientación es subparalela a la falla.

La relación de paralelismo entre la falla y la foliación, es más notable en la parte sur de este tramo de la estructura donde adquiere un rumbo NNE mejor definido (Fig. 5a y b). El diagrama estereográfico de la figura 7b muestra la concomitancia entre las orientaciones de la fábrica del basamento (líneas negras) y la falla Cachi central (líneas rojas).

La heterogeneidad mecánica del basamento y las fallas Cachi central y occidental muestran orientaciones semejantes que sustentan la reutilización de las estructuras dúctiles paleozoicas durante las deformaciones extensional cretácica y contraccionales posteriores (e.g. Morley et al. 2004) tal como se describe para otras áreas cercanas como el borde occidental del valle de Luracatao (Hongn et al. 2010, Santimano y Riller 2012) o en la continuación austral del sistema de fallas Cachi (Hongn y Seggiaro 1998, Aramayo 2019).

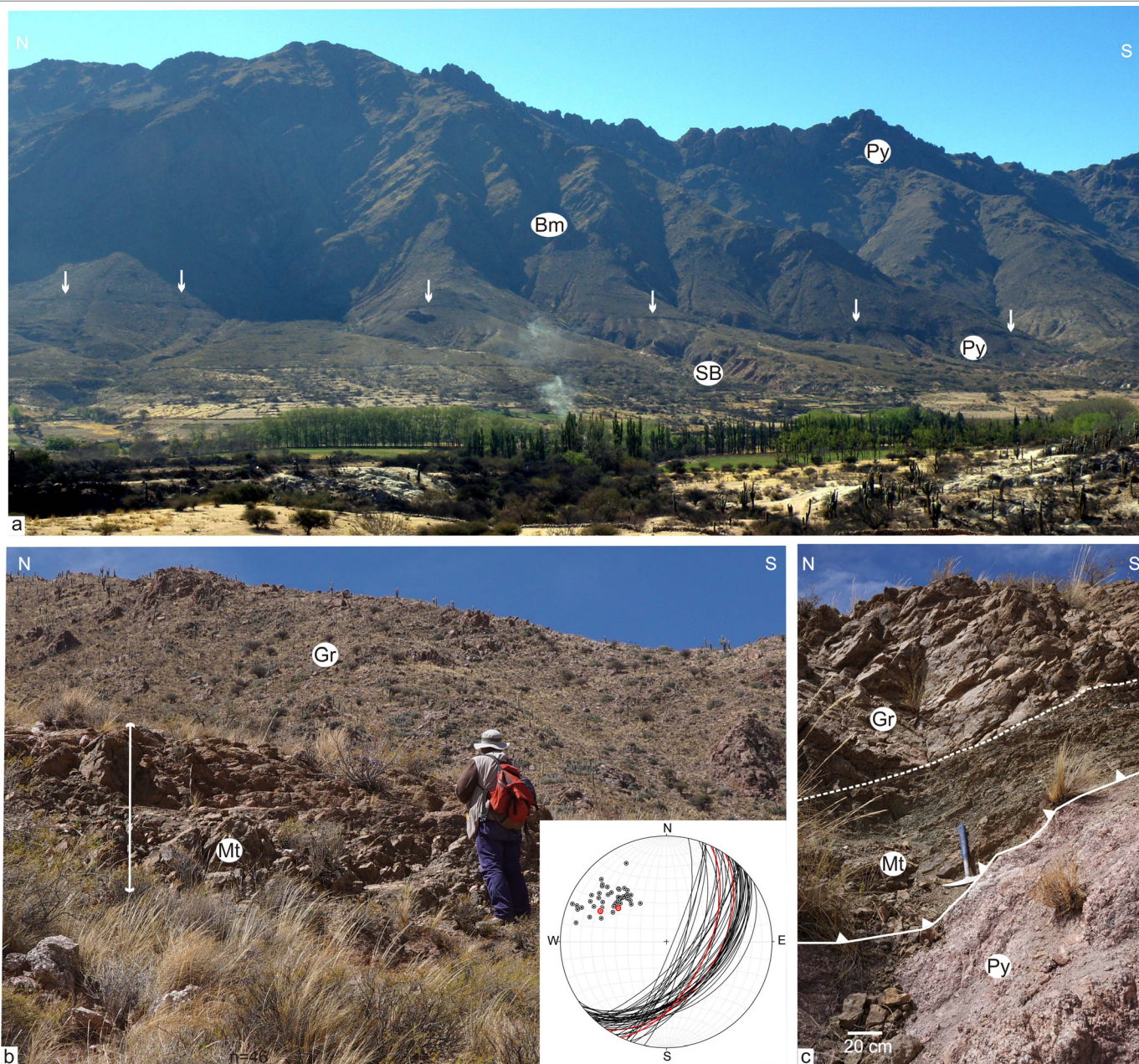
Unos 150 m al oeste de la escarpa de la falla Cachi central, se observa que la falla Cachi occidental, yuxtapone las sucesiones del Subgrupo Pigua sobre las de postrift del Subgrupo Santa Bárbara (Fig. 5). El rechazo inverso mínimo es de 750 m considerando los espesores medidos por Payrola Bosio (2010) en las sucesiones de postrift del Grupo Salta y las basales del antepaís paleógeno (Formación Quebrada de los Colorados).

## DISCUSIÓN

### El sistema de fallas Cachi

A partir de las nuevas observaciones se desprende que el diseño de las estructuras que componen el sistema de fallas Cachi difiere al descrito en trabajos previos en los que sólo se indicaba una falla principal o una falla principal y una ramificación occidental (Hongn y Seggiaro 2001, Carrera et al. 2006, Payrola Bosio et al. 2009). El análisis detallado revela diferentes diseños en los tres tramos analizados donde en el sur existe una falla principal, en el central se detectaron tres fallas y en el septentrional dos (Fig. 2). La figura 8 es-





**Figura 7.** a-b) Vista hacia el este del resalto topográfico (flecha blanca) asociado a la escarpa de la falla central (Fce) que levanta el basamento ígneo-metamórfico (Bm) sobre los conglomerados del Subgrupo Pirgua (Py). El diagrama estereográfico muestra el paralelismo entre la fábrica del basamento (negro; 48 datos de foliación en metamorfita y granito) y la falla (rojo); c) Vista en detalle donde se observa el paralelismo entre la estructura del basamento, el contacto metamorfita (Mt) - granito (Gr), y la falla.

quematiza algunas de las interpretaciones posibles tomando como base dos situaciones iniciales, una representa el borde del hemigraben con una falla normal principal y una serie de fallas secundarias sobre el bloque bajo (Fig. 8a), y la otra considera que sólo existe una falla normal (Fig. 8b). Seguramente los diseños reales son más complejos que los esquematizados que representan simplificaciones de las relaciones de conexión y transferencias entre estructuras extensionales tal las descritas profusamente en la literatura (e.g. Morley et al. 1990, Peacock 2002); investigar y determinar estas relaciones escapa a los objetivos de esta contribución. Se interpreta

que el sistema de fallas Cachi muestra diferentes diseños a lo largo de su rumbo, a la latitud de Refugio se observa un borde de hemigraben con una falla principal que hacia el norte se desvía hacia el interior de las cumbres de la Laguna-sierra de Cachi a la vez que se desprenden ramificaciones de fallas menores desde la principal (sectores Pata Pampa y Las Pailas, Fig. 8c). Se considera que la falla Cachi oriental es la principal porque a ella se vinculan las sucesiones sinrift de mayor desarrollo vertical y lateral, además de las facies con mayor participación de brechas y conglomerados proximales. Estas variaciones en el diseño del sistema de fallas conducen a di-

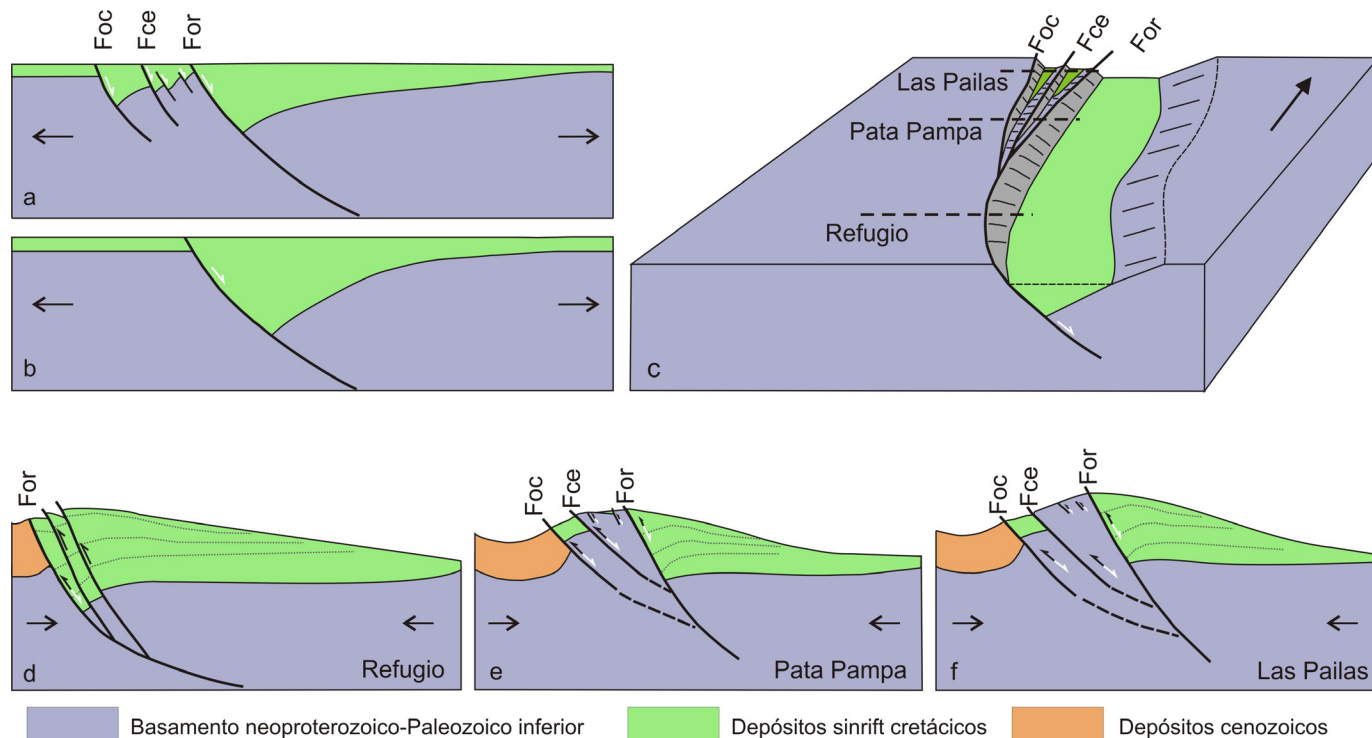


ferentes comportamientos durante la inversión tectónica. Así, en la sección de Refugio (Fig. 8d), la inversión se concentra sobre la falla normal principal junto con una serie de fallas inversas o corrimientos de paso en el bloque colgante (*Bypass hangingwall thrust*, McClay y Buchanan 1992) que registran etapas de movimientos cenozoicos (Fig. 3). Hacia el norte, en las secciones de Pata Pampa (Fig. 8e) y Las Pailas (Fig. 8f), la inversión es más notable sobre las ramificaciones porque monta el basamento sobre la facies de sinrift (falla central) y a esta sobre las sucesiones postrift del Grupo Salta y los depósitos de antepaís de la Formación Quebrada de los Colorados (falla occidental), aunque esto no es suficiente para determinar cuál de las estructuras acomoda mayor acortamiento. Los desplazamientos inversos durante el acortamiento cenozoico no son posibles de cuantificar con la información disponible, porque no se preservan espesores completos en los diferentes bloques. De acuerdo con las unidades preservadas e identificadas, el mayor desplazamiento inverso estaría registrado en la falla occidental porque levanta facies de sinrift sobre la espesa cobertura cenozoica de aproximadamente 900 m de potencia (Subgrupo Santa Bárbara y Formación Quebrada de los Colorados, Payrola Bosio et al. 2009). Por su parte, el bloque de basamento elevado por la inversión de la falla cen-

tral preserva, aunque sea de forma aislada, la base de sucesiones de sinrift, por lo que su desplazamiento inverso sería comparable al del espesor de estas facies, el que debería ser reducido considerando la interpretación de que rellenaron espacios asociados a las fallas normales secundarias que se ramificaron o transfirieron desde la principal.

La falla Cachi oriental o falla normal principal del sistema no preserva evidencias nítidas de inversión en las secciones de Pata Pampa y Las Pailas dado que en el bloque hundido se preservan los mayores espesores de sinrift. Sin embargo, el mayor relieve estructural está asociado a esta estructura por lo que cabe como hipótesis que parte del acortamiento se acomode en atajos en el bloque de piso que probablemente reutilizaron o reactivaron las fallas normales secundarias que se ramificaron de la principal (Fig. 8e y f). En el extremo sur del valle, zona de La Aguadita (Fig. 1), Carrera et al. (2006) describen que el acortamiento se acomoda principalmente a través de un atajo que corre el basamento sobre la Formación Quebrada de los Colorados con un desplazamiento inverso superior a los 1000 m.

Una alternativa es que las fallas Cachi central y occidental correspondan solamente a atajos derivados de la inversión de la falla oriental principal, en ese caso las sucesiones preser-



**Figura 8.** Modelos esquemáticos de: a) Borde de hemigraben con múltiples fallas normales (secciones de Pata Pampa y Las Pailas); b) Borde de hemigraben con una falla normal principal (sección de Refugio); c) Diagrama esquematizando la falla Cachi principal (For), y las ramificaciones (Fce y Foc); d-f) Esquemas de fallas con inversión tectónica, las líneas entrecortadas indican potenciales atajos que probablemente reutilizaron parcialmente las fallas normales secundarias. Flechas blancas indican movimiento normal, flechas negras la inversión. La falla oriental o principal se interpreta con un bajo grado de inversión en los perfiles de Pata Pampa y Las Pailas.

vadas en el bloque bajo de las fallas oriental y central durante la inversión tectónica corresponderían a depósitos sinrift de escaso espesor que cubrirían el bloque de piso de la falla normal principal. Sin embargo, los relictos de brechas y conglomerados basales de facies sinrift en el bloque colgante de la falla central en el perfil de Pata Pampa, en algunos casos preservando delgadas cuñas de conglomerados asociados a fallas directas menores (Fig. 4a), sugieren que las tres fallas (oriental, central y occidental) tuvieron una etapa inicial con movimiento normal durante la extensión cretácica.

En este contexto se interpreta que la falla Cachi oriental fue la estructura principal durante la extensión mesozoica y las fallas Cachi central y occidental constituían estructuras normales con menor rechazo y consecuentemente menor espesor de depósitos sinrift en los bloques de techo; esas fallas normales se ramificaron de la falla principal que se extendía hacia el norte y que controló los depósitos sinrift preservados como islas de menor extensión y espesor (< 500 m de potencia), en el cerro Incauca y en el valle de las Cuevas (Fig. 1) (Hongn y Seggiaro 1998, 2001). La inversión de la falla Cachi oriental o falla principal preserva sus mejores ejemplos en el tramo austral del valle de Luracatao (zona de Refugio, Figs. 2 y 8d), ya que allí está documentada fundamentalmente en la estructura que define el borde oriental del valle. Hacia el norte, el acortamiento se resuelve también en las fallas Cachi central y occidental.

La porción norte del borde oriental del valle Luracatao, fuera de nuestra área de estudio, está marcada por una falla inversa que levanta el basamento ígneo-metamórfico sobre el relleno postrift y sinorogénico cenozoico (Hongn y Seggiaro 2001, Deeken et al. 2006). No es posible precisar si existe un control directo de las fallas normales sobre este corrimiento o si la estructura es una falla inversa cenozoica que posiblemente se propagó a partir de la estructura resultante de la unión de las fallas Cachi central y occidental, es decir una falla inversa cenozoica que crece y se propaga a partir de estructuras normales preexistentes con inversión tectónica.

Hacia el sur del valle de Luracatao, las sucesiones sinrift disminuyen su espesor como ocurre hacia el norte, y el acortamiento cenozoico se acomoda principalmente a través de atajos como en La Aguadita (Carrera et al. 2006) o más al sur en Colomé (fuera del mapa de la Fig. 1) (Hongn y Seggiaro 2001). Considerando que las sucesiones sinrift disminuyen su representación hacia el norte y sur, cabe la hipótesis de una mayor complejidad en la zona sur del valle de Luracatao que corresponde al área de acumulación de mayor espesor en la subcuenca Brealito (Sabino 2002, 2004). En la porción analizada las estructuras muestran variaciones en el rumbo entre NNO y NNE como resultado de ramificaciones secundarias,

posiblemente vinculados con sistemas de transferencia (e.g. Grier et al. 1991, Cartwright et al. 1996).

En base al análisis cinemático de fallas menores medidas en el tramo medio y sur del sector occidental de las cumbres de la Laguna, Santimano y Riller (2012) determinan que el acortamiento principal asociado a la falla Cachi es en dirección aproximadamente ONO-ESE con una extensión subvertical. Estos resultados son comparables con los obtenidos en este trabajo (Fig. 4) pero no es posible discernir los tiempos asociados a las estructuras que acomodan el acortamiento cenozoico y cuaternario, hecho que impide profundizar las interpretaciones.

### Actividad múltiple del sistema de fallas Cachi

Otro aspecto de interés es la reutilización de estructuras previas en el sistema de fallas Cachi. Numerosos trabajos han planteado con diferentes enfoques y argumentos la influencia de las estructuras precedentes sobre el desarrollo y evolución tectosedimentaria del antepaís cenozoico en esta región de los Andes Centrales (e.g. Allmendinger et al. 1983, Hilley y Strecker 2005, Hongn et al. 2010). El sistema de fallas Cachi ofrece un caso de estudio de los controles que ejercen estructuras discretas convenientemente orientadas, que registran diferentes etapas de actividad de acuerdo con el registro estratigráfico. El basamento muestra dos rasgos cuya orientación es aproximadamente paralela a las estructuras mesozoicas y cenozoicas. Por un lado, variaciones litológicas definidas por contactos entre metamorfitas, plutones y diques, por otro la foliación que se desarrolla en el conjunto y que se expresa de varias formas, desde plutones ligeramente foliados hasta fajas con una foliación muy bien definida que localmente se manifiesta en fajas miloníticas. Diversos autores describen en áreas cercanas la influencia de estas fábricas del basamento en la localización de las estructuras más modernas (Hongn y Seggiaro 1998, 2001, Hongn y Becchio 1999, Riller y Hongn 2003, Hongn et al. 2010, Santimano y Riller 2012, Aramayo 2019), en el caso del borde oriental del valle de Luracatao existe concordancia entre la orientación de las fábricas del basamento y la de las fallas normales del rift cretácico. El retrabajo (Holdsworth et al. 2001) del basamento ígneo-metamórfico durante los episodios tectonometamórficos del Paleozoico inferior (Hongn y Mon 1999, Hongn et al. 2006, 2010) resultó en una heterogeneidad mecánica convenientemente orientada que fue reactivada, al menos en los niveles de exposición actual, durante la extensión cretácica.

La inversión inicial y posteriores procesos de reactivación del sistema de fallas Cachi ocurrió durante el acortamiento andino (Hongn y Seggiaro 2001, Carrera et al. 2006), con etapas múltiples y superpuestas de movimientos inversos



que además de invertir las fallas normales del rift cretácico también reactivaron en el dominio frágil las fábricas del basamento.

Las estructuras de crecimiento (Fig. 4c y f) en la Formación Quebrada de los Colorados depositada desde el Eoceno medio en áreas próximas al borde oriental del valle documentan la actividad del sistema de fallas Cachi durante el Paleógeno, ampliando y reafirmando las observaciones de Payrola Bosio et al. (2009) en otras regiones del valle de Luracatao. Este cambio cinemático sobre las fallas normales vinculadas al rift constituye el evento de inversión tectónica principal dado que implica un cambio de régimen de extensión a acortamiento, los siguientes movimientos inversos constituyen reactivaciones de las estructuras con inversión paleógena.

Los escasos afloramientos de unidades neógenas (Payrola Bosio 2010) limitan la observación de evidencias sedimentológico-estratigráficas de movimientos contemporáneos en el sistema de fallas Cachi. Sin embargo, una muestra de basamento tomada a 2810 m de altura sobre el bloque colgante de la falla Cachi central brindó una edad de enfriamiento de ca. 16 Ma (Deeken et al. 2006) lo cual indica un episodio de exhumación neógeno que seguramente estuvo vinculado con la actividad del sistema de fallas Cachi. Además, en regiones cercanas las discordancias internas detectadas en la Formación Angastaco y entre las unidades inferiores y superiores del Grupo Payogastilla (Carrera y Muñoz 2008, Payrola et al. 2020, del Papa et al. 2021) constituyen evidencias de la deformación neógena que también se debería registrar en el valle de Luracatao, dado que en continuidad hacia el sur existen ejemplos bien documentados (Aramayo et al. 2017b).

Los nuevos datos de campo presentados en este trabajo amplían y profundizan las evidencias de deformación cuaternaria en el sistema de fallas Cachi. Así, en el área de Refugio se preservan una serie de fallas que levantan las sucesiones de sinrift sobre conglomerados (Fig. 3b) asociados a sistemas fluviales y aluviales que por sus características son atribuibles al Cuaternario. En el sector de Pata Pampa norte el pliegue en los depósitos conglomerádicos ubicado en el bloque yacente de la falla Cachi occidental (Fig. 4e), evidencia un evento de deformación cuaternario. Si bien no existen certezas de la edad cuaternaria de estos depósitos, esta asignación temporal se refuerza al considerar que las etapas de reactivación cuaternaria del sistema de fallas Cachi también están expresadas por la preservación de rasgos topográficos. La escarpa de orientación meridional, paralela al río Luracatao, constituye la evidencia más notable claramente visible tanto en imágenes de satélite (Fig. 6b) como en el campo (Fig. 7a y b). Esta escarpa tiene diferentes alturas a lo largo de su traza, siendo la mayor hacia el norte donde

se midió un salto topográfico de aproximadamente 3 m (Fig. 6 y 7b). Aramayo (2019) documentó otro tramo de la falla con expresión topográfica en el extremo sur del valle de Luracatao. Los nuevos datos sustentan la actividad neotectónica del sistema de fallas Cachi documentando una nueva reactivación durante el Cuaternario, aunque no son suficientes para caracterizar de forma precisa el comportamiento durante sus últimas reactivaciones, es decir si las escarpas que se preservan en diferentes tramos responden a un único evento de rotura en superficie.

El relevamiento detallado del sistema de fallas del borde oriental del valle de Luracatao revela una historia donde las fábricas del basamento (foliación y contactos litológicos) son en general paralelas o subparalelas a las principales expresiones del sistema de fallas Cachi. Estas debilidades o heterogeneidades mecánicas convenientemente orientadas se reactivaron durante la extensión cretácica que enmarcó el desarrollo del hemigraben de Brealito-Molinos, generando fallas normales que registran una etapa de inversión en el Eoceno y posteriores reactivaciones neógeno-cuaternarias. Las fallas del borde oriental del valle de Luracatao constituyen a esta latitud la expresión más occidental de estructuras de vergencia occidental vinculadas con la inversión de fallas directas del rift cretácico.

La extensa historia que incluye los múltiples episodios de reactivación desde el Eoceno muestran que esta zona se mantuvo activa aun en las etapas en las que la cuña orogénica se expandió hacia el oriente (Pearson et al. 2013) sugiriendo que el antepaís fragmentado en este segmento de los Andes del NOA propició más la propagación irregular de la deformación que la migración regular hacia el borde de la cuña como ocurre en la porción subandina. Las fábricas y debilidades mecánicas del basamento y las fallas normales del rift cretácico, definen un sustrato marcadamente heterogéneo para las cuencas del antepaís cenozoico (e.g. Hongn et al. 2010, Strecker et al. 2012, del Papa et al. 2013). En el caso del sistema de fallas Cachi este control inicia con la generación de una heterogeneidad mecánica representada por la fábrica del basamento resultado de los procesos de reemplazo orogénico ocurridos en el Paleozoico inferior (Hongn et al. 2010). Posteriormente ocurre la reactivación de estas fábricas del basamento en condiciones frágiles durante la extensión cretácica dando lugar al control de las fallas normales, y continúan con la inversión de las fallas normales seguida de reactivaciones durante al menos tres tiempos cenozoicos de acuerdo con el registro estratigráfico, termocronológico y geomorfológico: Paleógeno, Neógeno y Cuaternario.

## CONCLUSIONES

Se mapearon tres fallas que conforman el sistema de fallas Cachi denominadas de este a oeste: falla oriental, falla central y falla occidental. Se interpreta que la falla Cachi oriental es la falla normal principal desarrollada durante el rift cretácico, que presenta ramificaciones hacia el oeste (fallas central y occidental).

El sistema de fallas Cachi registra eventos múltiples de deformación que inician con las fábricas paleozoicas del basamento reutilizadas por las fallas normales cretácicas las cuales registran al menos tres eventos de movimiento inverso, primero la inversión tectónica durante el Eoceno y posteriormente las reactivaciones neógena y cuaternaria.

Se registra actividad reciente evidenciada por fallas y pliegues que afectan depósitos atribuibles al Cuaternario, y una escarpa de falla bien preservada con un resalto de ca. 3 m destacable tanto en imágenes de satélite como en campo.

Se destaca la reactivación de estructuras paleozoicas en el sistema de fallas Cachi. La influencia de estructuras discretas desarrolladas en el basamento ígneo-metamórfico muestra dos rasgos cuya orientación es aproximadamente paralela a las estructuras mesozoicas y cenozoicas, por un lado, variaciones litológicas y por otro el desarrollo de foliación. Estas debilidades mecánicas habrían propiciado el desarrollo de las estructuras durante las etapas extensionales cretácicas y de inversión cenozoicas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por CONICET (PUE IBIGEO, A2.4 y A2.6-StRATEGy), ANPCyT (PICT2017-1928) y CIUN-Sa 2336. Se agradece a los pobladores del valle de Luracatao en especial a Don Roque Tapia y familia (paraje Las Pailas) y a Emilio Guaymas (paraje Pata Pampa). Este manuscrito fue mejorado sustancialmente por los aportes de los Dres. Florencia Bechis y José Allard. Se agradece al editor a cargo Dr. José Mescua.

## REFERENCIAS

Aceñolaza, F.G., Durand, F. y Díaz Taddei, R. 1976. Geología y contenido paleontológico del basamento de la región de Cachi, Provincia de Salta, República Argentina. 6° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 319-332, Buenos Aires.

Allmendinger, R.W., Ramos, V.A., Jordan, T.E., Palma, M. e Isacks, B.L. 1983. Paleogeography and Andean structural geometry, northwest Argentina. *Tectonics* 2 (1): 1-16.

Allmendinger, R., Cardozo, N. y Fisher, D. 2012. Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology. Cambridge University Press, 289 p., Cambridge.

Aramayo, A., Hongn, F. y del Papa, C. 2017a. Acortamiento paleógeno en el tramo medio de los Valles Calchaquíes: depositación sintectónica de la Formación Quebrada de los Colorados. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74 (4): 524-536.

Aramayo, A., Guzmán, S., Hongn, F., del Papa, C., Montero-López, C. y Sudo, M. 2017b. A brief (~1.5 my) and intense shortening event constrained by middle miocene volcanism along the puna-eastern cordillera border, NW Argentina. *Tectonophysics* 703: 9-22.

Aramayo, G. 2019. Estructura y neotectónica del extremo sur del valle de Luracatao, entre Refugio y La Aguadita, provincia de Salta. Tesis profesional, Universidad Nacional de Salta (inédita), 108 p., Salta.

Blasco, G. y Zapettini, E. 1995. Geología. En: Blasco, G., Zapettini, E. y Hongn, F. (eds.), Hoja Geológica San Antonio de los Cobres (Mapa), Escala 1:250.000. Secretaría de Minería de la Nación, Dirección Nacional del Servicio Geológico, Buenos Aires.

Bull, W.B. 2007. Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology. Blackwell Publishing, 328 p., Oxford.

Cardozo, N. y Allmendinger, R.W. 2013. Spherical projections with OSX Stereonet: Computers & Geosciences 51: 193-205.

Carrapa, B. y DeCelles, P.G. 2008. Eocene exhumation and basin development in the Puna of northwestern Argentina. *Tectonics* 27 (1): TC1015.

Carrera, N. y Muñoz, J.A. 2008. Thrusting evolution in the southern Cordillera Oriental (northern Argentine Andes): Constraints from growth strata. *Tectonophysics* 459 (1-4):107-122.

Carrera, N. y Muñoz, J.A. 2013. Thick-skinned tectonic style resulting from the inversion of previous structures in the southern Cordillera Oriental (NW Argentine Andes). Geological Society, London, Special Publications 377: 77- 100.

Carrera, N., Muñoz, J.A., Sàbat, F., Mon, R. y Roca, E. 2006. The role of inversion tectonics in the structure of Cordillera Oriental (NW Argentinean Andes). *Journal of Structural Geology* 28 (11): 1921-1932.

Cartwright J.A., Mansfield C. y Trudgill B. 1996. The growth of normal faults by segment linkage. En: Buchanan, R. G. y Nieuwland, D. A. (eds), Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modelling. Geological Society Special Publication 99: 163-177.

Casa, A., Yamin, M., Wright, E., Costa, C., Coppolecchia, M., Cegarra, M. y Hongn, F. 2014. Deformaciones Cuaternarias de la República Argentina, Sistema de Información Geográfica. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, v2.0, en formato DVD (<http://sig.segemar.gov.ar/>).

Castillo, A. y Suárez, O. 1989. La zona metamórfica sillimanítica de Tacuil-Cerro Blanco, Salta, República Argentina. En: Schalamuk, I., Brodtkorb, M. y Leanza, H. (eds.), Procesos Metalogénicos. Universidad Nacional de Tucumán, Serie de Correlación Geológica 3: 119-208, San Miguel de Tucumán.



- Coutand, I., Cobbold, P., de Urreizietza, M., Gautier, P., Chauvin, A., Gaspais, D., Rossello, E. y López Gamundi, O. 2001. Style and history of Andean deformation. Puna plateau, northwestern Argentina. *Tectonics* 20 (2): 210-234.
- DeCelles, P.G., Carrapa, B. y Horton, H. 2011. Cenozoic foreland basin system in the central Andes of northwestern Argentina, Implications for Andean geodynamics and modes of deformation. *Tectonics* 30: TC6013.
- Deeken, A., Sobel, E., Coutand, I., Haschke, M., Riller, U. y Strecker, M. 2006. Development of the southern Eastern Cordillera, NW Argentina, constrained by apatite fission track thermochronology: From early Cretaceous extension to middle Miocene shortening. *Tectonics* 25 (6): TC6003.
- del Papa, C.E., Hongn, F., Powell, J., Payrola Bosio, P., Do Campo, M., Strecker, M.R., Petrinovic, I., Schmitt, A.K. y Pereyra, R. 2013. Middle Eocene-Oligocene broken foreland evolution in the Andean Calchaqui Valley, NW Argentina: insights from stratigraphic, structural and provenance studies. *Basin Research* 25 (5): 574-593.
- del Papa, C.E., Payrola, P., Pingel, H., Hongn, F., Do Campo, M., Sobel, E.R., Lapiana, A., Cottle, J., Glodny, J. y Strecker, M.R. 2021. Stratigraphic response to fragmentation of the Miocene Andean foreland basin, NW Argentina. *Basin Research* 33 (6): 2914-2937.
- Díaz, J. y Malizzia, D. 1983. Estudio geológico y sedimentológico del Terciario Superior del Valle Calchaquí (Dpto. San Carlos; Salta). *Boletín Sedimentológico* 2: 8-28.
- Figuerola, S., Weiss, J., Hongn, F., Pingel, H., Escalante, L., Elías, L., Aranda-Viana, G. y Strecker, M. 2020. Late Pleistocene to recent deformation in the thick-skinned fold-and-thrust belt of northwestern Argentina (central Calchaquí Valley, 26° S). *Tectonics* 40: e2020TC006394.
- Finch, M.A., Weinberg, R.F., Fuentes, M.G., Hasalová, P. y Becchio, R., 2015. One kilometre-thick ultramylonite, Sierra de Quilmes, Sierras Pampeanas, NW Argentina. *Journal of Structural Geology* 72: 33-54.
- Galli, C. y Hernández, R. 1999. Evolución de la cuenca de antepaís desde la zona de la Cumbre Calchaquí hasta la Sierra de Santa Bárbara, Eoceno inferior-Mioceno medio, provincia de Salta, Argentina. *Acta Geológica Hispánica* 34 (2): 167-184.
- Galli, C.I., Coira, B., Alonso, R.N., Reynolds, J., Matteini, M. y Hauser, N. 2014. Tectonic control on the evolution of the Andean Cenozoic foreland basin: Evidence from fluvial system variations in the Payogastilla Group, in the Calchaquí, Tonco and Amblayo valleys, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 52: 234-259.
- García, V., Casa, A., Hongn, F., Figuerola, S., Aranda, G., Escalante, L., Montero, C., Yamín, M., Amengual, R. y Aramayo, A. 2017. Deformación cuaternaria. En: Muruaga, C. y Grosse, P. (eds.), *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA*. 20° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 624-645, San Miguel de Tucumán.
- Grasemann, B., Martel, S. y Passchier, C. 2005. Reverse and normal drag along a fault. *Journal of Structural Geology* 27: 999-1010.
- Grier, M.E., Salfity, J. y Allmendinger, R. 1991. Andean reactivation of the Cretaceous Salta rift, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 4 (4): 351-372.
- Hilley, G.E. y Strecker, M. 2005. Processes of oscillatory basin filling and excavation in a tectonically active orogen: quebrada del Toro Basin, NW Argentina. *Geological Society of America Bulletin* 117 (7-8): 887-901.
- Holdsworth, R.E., Hand, M., Miller, J.A. y Buick, I.S. 2001. Continental reactivation and reworking: an introduction. En: Miller, J.A., Holdsworth, R.E., Buick, I.S. y Hand, M. (eds.), *Continental Reactivation and Reworking*. The Geological Society, Special Publication 184: 1-12, London.
- Hongn, F.D. y Seggiaro, R. 1998. Estructuras del basamento y su relación con el rift cretácico, Valles calchaquíes, provincia de Salta. 10° Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 2: 4-9, Buenos Aires.
- Hongn, F.D. y Becchio, R.A. 1999. Las fajas miloníticas de Brealito, Valles Calchaquíes, Salta. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 54 (1): 74-87.
- Hongn, F.D. y Mon, R. 1999. La deformación ordovícica en el borde oriental de la Puna. En: González Bonorino, G., Omarini, R. y Viramonte, J.G. (eds.), *Geología del Noroeste Argentino*. 14° Congreso Geológico Argentino, Relatorio 1: 212-216, Salta.
- Hongn, F.D. y Seggiaro, R. 2001. Hoja Geológica 2566 – III. Cachi. Provincias de Salta y Catamarca. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. *Boletín* 248, 87 p. Buenos Aires.
- Hongn, F.D., Seggiaro, R.E. y Marrett, R. 1996. Basement structure and its role during Cretaceous extension and Andean (Mio-Pliocene) contraction, Calchaquí Valleys, NW Argentina. *EOS (American Geophysical Union Transactions)* 77: S259.
- Hongn, F., Mon, R., del Papa, C., Petrinovic, I. y Powell, J. 2006. Herencia de anisotropías del basamento en las cuencas de rift cretácico y antepaís cenozoico en el noroeste argentino. 13° Reunión de Tectónica, Actas en CD, San Luis.
- Hongn, F., del Papa, C., Powell, J., Petrinovic, I., Mon, R. y Deraco, V. 2007. Middle Eocene deformation and sedimentation in the Puna-Eastern Cordillera transition (23°-26° S): control by preexisting heterogeneities on the pattern of initial Andean shortening. *Geology* 35 (3): 271-274.
- Hongn, F., Mon, R., Petrinovic, I., del Papa, C.E. y Powell, J. 2010. Inversión y reactivación tectónicas cretácico-cenozoicas en el noroeste argentino: influencia de las heterogeneidades del basamento neoproterozoico-paleozoico inferior. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66: 38-53.
- Larovere, M.A., Suzaño, N., Ratschbacher, B.C., Sola, A., Alasino, P.H., Fuentes, M.G., Weinberg, R.F., Paterson, S.R., Becchio, R. y Finch, M.A. 2017. Las fajas de cizalla dúctil del basamento ígneo-metamórfico del NOA. En: Muruaga, C. y Grosse, P. (eds.), *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA*. 20° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 579-601, San Miguel de Tucumán.

- Marrett, R. y Allmendinger, R. 1990. Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of Structural Geology* 12: 973-986.
- McClay, K.R. y Buchanan, P.G. 1992. Thrust faults in inverted extensional basins. En: McClay, K.R. (ed.), *Thrust Tectonics*. Royal Holloway and Bedford New College, University of London: 93-104, London.
- Méndez, V., Navarini, A., Plaza, D. y Viera, V. 1973. Faja Eruptiva de la Puna Oriental. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 89-100, Buenos Aires.
- Mon, R. y Salfity, J. 1995. Tectonic evolution of the Andes of Northern Argentina. En: Tankard, A., Suárez, A. y Welsink, H. (eds.), *Petroleum basins of South America*. AAPG Memoir 62: 269-283.
- Montero-López, C., del Papa, C., Hongn, F., Strecker, M.R. y Aramayo, A. 2018. Synsedimentary broken-foreland tectonics during the Paleogene in the Andes of NW Argentine: new evidence from regional to centimetre-scale deformation features. *Basin Research* 30: 142-159.
- Montero-López, C., Hongn, F., López Steinmetz, R.L., Aramayo, A., Pingel, H., Strecker, M.R., Cottle, J.M. y Bianchi, C. 2021. Development of an incipient Paleogene topography between the present-day Eastern Andean Plateau (Puna) and the Eastern Cordillera, southern Central Andes, NW Argentina. *Basin Research* 33 (2): 1194-1217.
- Morley, C.K., Nelson, R.A., Patton, T.L. y Munn, S.G. 1990. Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. *AAPG Bulletin* 74: 1234-1253.
- Morley, C.K., Haranyac, C., Phoosongseec, W., Pongwapeead, S., Korsawanc, A. y Wonganan, N. 2004. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: examples from the rifts of Thailand. *Journal of Structural Geology* 26: 1803-1829.
- Payrola Bosio, P.A. 2010. Estratigrafía y estructura del valle de Luracatao, transición Puna-Cordillera Oriental, Salta: Vinculaciones con las cuencas de rift cretácico y antepaís andino. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta (inédita), 208 p., Salta.
- Payrola Bosio, P., Powel, J., del Papa, C. y Hongn, F. 2009. Middle Eocene deformation-sedimentation in the Luracatao valley: Tracking the beginning of the foreland basin of northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 28: 142-154.
- Payrola, P., del Papa, C., Aramayo, A., Pingel, H., Hongn, F., Sobel, E.R., Zeilinger, G., Strecker, M.R., Zapata, S., Cottle, J., Salado Paz, N. y Glodny, J. 2020. Episodic out-of-sequence deformation promoted by Cenozoic fault reactivation in NW Argentina. *Tectonophysics* 776: 228276.
- Peacock, D.C.P. 2002. Propagation, interaction and linkage in normal fault systems. *Earth Science Reviews* 58: 121-142.
- Pearson, D.M., Kapp, P., DeCelles, P.G., Reyners, P.W., Gehlers, G.E., Ducea, M.N. y Pullen, A. 2013. Influence of pre-Andean crustal structure on cenozoic thrust belt kinematics and shortening magnitude, Northwestern Argentina. *Geosphere* 9 (6): 1766-1782.
- Petit, J.P. 1987. Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology* 9 (5): 597-608.
- Riller, U. y Hongn, F.D. 2003. Structural significance of Paleozoic discontinuities on Cretaceous to Quaternary tectonism in the Eastern Cordillera, NW-Argentina. *Geophysical Research, Abstracts* 5: 02303.
- Sabino García, I.F. 2002. Geología del Subgrupo Pirgua (Cretácico) del noroeste argentino. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta (inédita), 261 p., Salta.
- Sabino, I.F. 2004. Estratigrafía de la Formación La Yesera (Cretácico): Base del relleno de sinrift del Grupo Salta, noroeste argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59 (2): 341-359.
- Salfity, J.A. 2004. Geología regional del Valle Calchaquí, Argentina. *Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Anales* 56: 133-150.
- Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. 1994. Tectonic and sedimentary evolution of Cretaceous-Eocene Salta Group basin, Argentina. En: Salfity J.A. (ed.), *Cretaceous Tectonics of the Andes*. Earth Evolution Sciences, Vieweg + Teubner Verlag: 266-315, Wiesbaden.
- Santimano, T.N. 2010. Deformation of the Eastern Cordillera, NW Argentina. Master Thesis, McMaster University (inédito), 57 p., Ontario.
- Santimano, T. y Riller, U. 2012. Kinematics of Tertiary to Quaternary intracontinental deformation of upper crust in the Eastern Cordillera, southern Central Andes, NW Argentina. *Tectonics* 31 (4): TC4002.
- Siks, B.C. y Horton, B.K. 2011. Growth and fragmentation of the Andean foreland basin during eastward advance of fold-thrust deformation, Puna plateau and Eastern Cordillera, northern Argentina. *Tectonics* 30 (6): TC6017.
- Stewart, I.S. y Hancock, P.L. 1990. What is a fault scarp?. *Episodes* 13 (4): 256-263.
- Strecker, M.R., Hilley, G.E., Bookhagen, B. y Sobel, E.R. 2012. Structural, geomorphic, and depositional characteristic of contiguous and broken foreland basins: examples from the eastern flanks of the Central Andes in Bolivia and NW Argentina. En: Busby C. y Azor Pérez A. (eds.), *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*. Blackwell Publishing: 508-522, New Jersey.
- Suzaño, N.O., Becchio, R.A., Sola, A., Ortiz, A., Nieves, A., Quiroga, M. y Fuentes, G. 2017. The role of magma mixing in the evolution of the Early Paleozoic calc-alkaline granitoid suites. Eastern magmatic belt, Puna, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 76: 25-46.
- Turner, J.C. 1960. Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y adyacencias. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba* 41: 163-196.
- Turner, J.C. 1961. Estratigrafía del Nevado de Cachi y adyacencias. *Acta Geológica Lilloana* 3: 191-226.
- Turner, J.C. 1964. Descripción Geológica de la hoja 7c, Nevado de Cachi, provincia de Salta. Dirección Nacional de Geología y Minería. *Boletín* 99, 79 p., Buenos Aires.
- Wallace, R.E. 1977. Profiles and ages of young fault scarps, north-central Nevada. *Geological Society of America Bulletin* 81: 2875-2889.
- Yamin, M., Coppolecchia, M., Seggiaro, R., Casa, A. y Cegarra, M. 2016.



Evaluación de la actividad neotectónica en el sector norte de los valles Calchaquíes, entre las localidades de Payogasta y Seclantás, provincia de Salta. Instituto de Recursos Geológicos Mineros, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie de Contribuciones Técnicas-Geología 4, 22 p., Buenos Aires.