

LA DEFORMACIÓN FAMATINIANA DEL GRANITO LA ESCALERILLA, SIERRA DE SAN LUIS

Augusto MOROSINI^{1,2} y Ariel ORTIZ SUÁREZ²

¹ Conicet. Email: afmorosi@unsl.edu.ar

² Universidad Nacional de San Luis, San Luis.

RESUMEN

En el presente trabajo se analizan las estructuras post-magmáticas del Granito La Escalerilla y se propone una interpretación sobre los mecanismos regionales de esfuerzos correspondientes al ciclo famatiniano en el sector suroccidental de la sierra de San Luis. Se considera que el plutón La Escalerilla condicionó el estilo de deformación de las unidades litológicas en su periferia. Ésta deformación estuvo ligada al contraste reológico producido entre el intrusivo y las metamorfitas de la roca de caja. La estructura del plutón está caracterizada por la presencia de: a) una foliación interna de orientación meridiana particularmente marcada en los sectores de borde, así como al norte y sur del cuerpo, b) una faja milonítica de rumbo NNE, en el contacto oriental, c) cizallas dúctiles conjugadas de tipo *Riedel* (NNO) y anti-*Riedel* (NE), estructuras interpretadas como parte de una tectónica de escape bajo un régimen transpresivo sinistral, y d) fracturas tensionales de orientación ONO. Todas estas estructuras se considera que responden a esfuerzos compresivos de dirección ONO, que generan una componente real de esfuerzo tangencial sinistral, de módulo variable, como consecuencia de la oblicuidad general del plutón, respecto al eje de máximo esfuerzo (σ_1). Sin embargo en algunos sectores esta componente tangencial es mínima debido a las diferentes orientaciones de los límites del cuerpo respecto al vector de máximo esfuerzo (σ_1).

Palabras clave: *Estructura, dúctil, reología, tectónica de escape, Sierras Pampeanas.*

ABSTRACT: *The Famatinian deformation of La Escalerilla Granite, Sierra de San Luis.* In this paper post-magmatic structures of La Escalerilla Granite are analyzed and an interpretation of regional deformation mechanisms is proposed for cycle Famatinian of the Southwestern sector of the Sierra de San Luis. It is thought that La Escalerilla pluton has conditioned the style of deformation of the lithologic units at its periphery. This deformation was linked to the rheological contrast which occurred between the intrusive and metamorphic country rocks. The structure of the pluton is characterized by the presence of: a) an internal foliation of submeridional orientation particularly marked in the border sectors, as well as to the north and south of the body; b) a NNE-trending mylonitic belt in the eastern contact; c) conjugated shears of synthetic *Riedel* (NNW) and antithetic *Riedel* (NE) types, interpreted as part of an tectonic escape under a sinistral transpressive regime; and d) tensional fractures of WNW orientation. All these structures are thought to correspond to the compression in the WNW-ESE direction, generating a real component of tangential sinistral stress, of variable module, because of the pluton general obliquity with relation the axis of maximum stress (σ_1). However, in some sectors this tangential component is minimal due to the different orientations of the boundaries of the body with respect to the vector of maximum stress (σ_1).

Keywords: *Structure, ductile, rheology, tectonic escape, Sierras Pampeanas.*

INTRODUCCIÓN

El basamento de la región sur de la sierra de San Luis está compuesto por rocas metamórficas de bajo a alto grado, que han sido agrupadas de diferentes maneras, el esquema más utilizado corresponde a tres complejos metamórficos: Nogolí, Pringles y Conlara definidos por Sims *et al.* (1997) y la Formación San Luis que incluye las unidades de menor grado metamórfico (Prozzi y Ramos 1988). Todas estas unidades poseen registros de una com-

pleja evolución desarrollada entre el Precámbrico y el Paleozoico inferior. Las rocas ígneas están representadas por numerosos intrusivos graníticos y en menor medida por cuerpos máficos y ultramáficos. Para los primeros han sido propuestos varios ordenamientos, Linares y Latorre (1973), Kilmurray y Dalla Salda (1976) plantearon el primer esquema dividiéndolos en tres ciclos, G1 Cámbrico (o Cámbrico-Ordovícico), G2 Devónico y G3 Carbonífero. Posteriormente Ortíz Suárez *et al.* (1992) los agruparon en pre,

sin y post-cinmáticos respecto a la fase de deformación ordovícica (480-450 Ma), esquema similar al utilizado por varios autores (López de Luchi 1993, Llambías *et al.* 1998, Sato *et al.* 2003, Brogioni *et al.* 2005). El mayor conocimiento de aspectos geológicos, petrográficos y radimétricos desarrollado por Sims *et al.* (1997) llevaron a plantear la existencia de dos ciclos magmáticos, uno Famatiniano y otro Achaliano. De esta manera, se configuran dos modelos básicos; uno, sustentado sólo en la existencia de una extensa evolu-

ción magmática que pertenece al ciclo Famatiniano, desarrollada entre el Cámbrico superior y el Devónico - Carbonífero (Llambías *et al.* 1998, Sato *et al.* 2003); y otro donde los granitoides pertenecerían a dos ciclo magmáticos diferentes, uno Famatiniano, formado por los granitos más antiguos (Ordovícicos), y otro Achaiano, que correspondería a los intrusivos de edad devónica, y en ambos casos de carácter sincinemático (Sims *et al.* 1997, López de Luchi *et al.* 2007).

El Granito La Escalerilla ha sido referido a diferentes grupos, en primer lugar se lo consideró, sobre la base de su deformación interna, como perteneciente al grupo de granitoides precinemáticos respecto la fase deformacional ordovícica (Ortiz Suárez *et al.* 1992), luego la existencia de una edad de 403 ± 6 Ma, modificó su ubicación y se consideró como parte de los granitoides devónicos (Sims *et al.* 1997, von Gosen 1998a, Steenken *et al.* 2008), aunque posteriormente se ha replanteado su ubicación, sobre la base de una nueva edad absoluta (von Gosen *et al.* 2002, Brogioni *et al.* 2005).

Respecto a la deformación que presenta el Granito La Escalerilla, se ha interpretado como resultado de un esfuerzo transpresivo sinistral, producto de una compresión aproximadamente ONO-ESE, que también habría producido el plegamiento y el primer clivaje de las filitas de la Formación San Luis y la segunda esquistosidad de los esquistos (von Gosen 1998b). Según este autor, éste proceso provoca la curvatura de la forma original, elongada en sentido NE-SO, y el desarrollo de una foliación interna, así como una faja milonítica en el borde oriental y fallas sinistralas en la zona central. Por otra parte Arrese *et al.* (2005) consideran una dirección de esfuerzo principal compresivo desde el ESE, con vergencia ONO y que provoca el cabalgamiento de los esquistos, ubicados al este, sobre el granito. De acuerdo a estos autores, esta deformación continúa con el desarrollo de fallas E-O dextrales que provocan la curvatura central del cuerpo, su foliación y su faja milonítica previamente desarrollada.

Morosini *et al.* (2006b) plantean un modelo de deformación para la región norte del Granito La Escalerilla, donde a partir de un cuerpo aproximadamente esférico, y como producto de una compresión ONO-ESE, se produce su aplastamiento, cambiando la forma, y generando zonas de cizalla de diferente orientación y sentido de movimiento en el sector occidental, sinestrales al norte y dextrales al sur de un punto central, provocando el escape por la diferente competencia del granito respecto a la caja metamórfica (Fig. 2g). El presente trabajo muestra una síntesis de los rasgos estructurales más significativos de la deformación del Granito La Escalerilla y tiene como objetivo unificar y/o esclarecer los conceptos propuestos anteriormente, aportando algunos rasgos que no han sido mencionados sobre la forma y disposición de las estructuras en el Granito La Escalerilla.

GENERALIDADES

La estructura del basamento de la sierra de San Luis es el resultado de una compleja evolución sobre la cual sólo se han descifrado los principales lineamientos. Los trabajos pioneros sobre el tema corresponden a Kilmurray y Dalla Salda (1976), quienes propusieron la existencia de tres dominios, donde se encuentran representados, tres fases de deformación, la primera asignada al Cámbrico y de orientación E-O, la segunda, con rumbo NE de edad devónica), y la tercera NO, carbonífera. Sobre este esquema Criado *et al.* (1981), asignan estas tres fases a los ciclos Pampeano, Famatiniano y Variscico, respectivamente. Durante la década del 90 se realizan una serie de trabajos sobre la estructura detallada del basamento metamórfico que dan lugar a dos planteos sobre su evolución, por un lado von Gosen y Prozzi (1998), proponen la existencia de tres etapas: una prefamatiniana, donde se reconocen tres foliaciones presentes en el complejo del basamento occidental (Complejo Metamórfico Nogolí), y cuya edad es incierta, probablemente proterozoica, una famatiniana, con dos fases de

deformación y una posfamatiniana, que genera por un lado la esquistosidad en las filitas de la Formación San Luis, y por otro, una segunda foliación, más localizada, y cuyas edades, probablemente, estarían ubicadas en el Devónico. Por otra parte Sims *et al.* (1997) asignan al ciclo Pampeano las metamorfitas de los complejos metamórficos Nogolí y Conlara), seguido del ciclo Famatiniano que se desarrolla con la sedimentación de los materiales del Complejo Metamórfico Pringles que es afectado por una etapa compresional, de alto grado metamórfico y seguida de una etapa extensional, donde se depositaron los sedimentos de la Formación San Luis, luego deformados por el ciclo achaliano, junto con el desarrollo de fajas de cizalla, de edad devónica.

Steenken *et al.* (2008) han trabajado en aspectos estructurales y geocronológicos, proponiendo una historia pampeana para el Complejo Metamórfico Conlara, mientras que el Complejo Metamórfico Pringles y la Formación San Luis, tendrían solo las deformaciones famatinianas y achalianas.

Específicamente en el área de estudio, las estructuras metamórficas pre-famatinianas sólo son reconocidas en algunos sectores de los complejos metamórficos Nogolí y Pringles (Sims *et al.* 1998). Se trata de foliaciones relicticas de rumbo aproximadamente NO (González *et al.* 2002).

Asimismo existen tres superficies de foliación consideradas de edad famatiniana (S_{1F} , S_{2F} y S_{3F}). Las rocas metamórficas que conservan la estructura S_{1F} corresponden a los complejos metamórficos Pringles, Nogolí, y los esquistos de la Formación San Luis. La estructura S_{2F} es la superficie más penetrativa en todo el basamento, afecta a todas las unidades del área, y representa al clímax tectono-térmico famatiniano. La estructura S_{3F} se vincula a las zonas de cizalla, clivaje de crenulación de desarrollo local y contactos entre unidades ígneas y metamórficas.

La estructura S_{1F} es de rumbo variable y se encuentra generalmente preservada en sombras de deformación. Está representada por pliegues apretados y simétricos

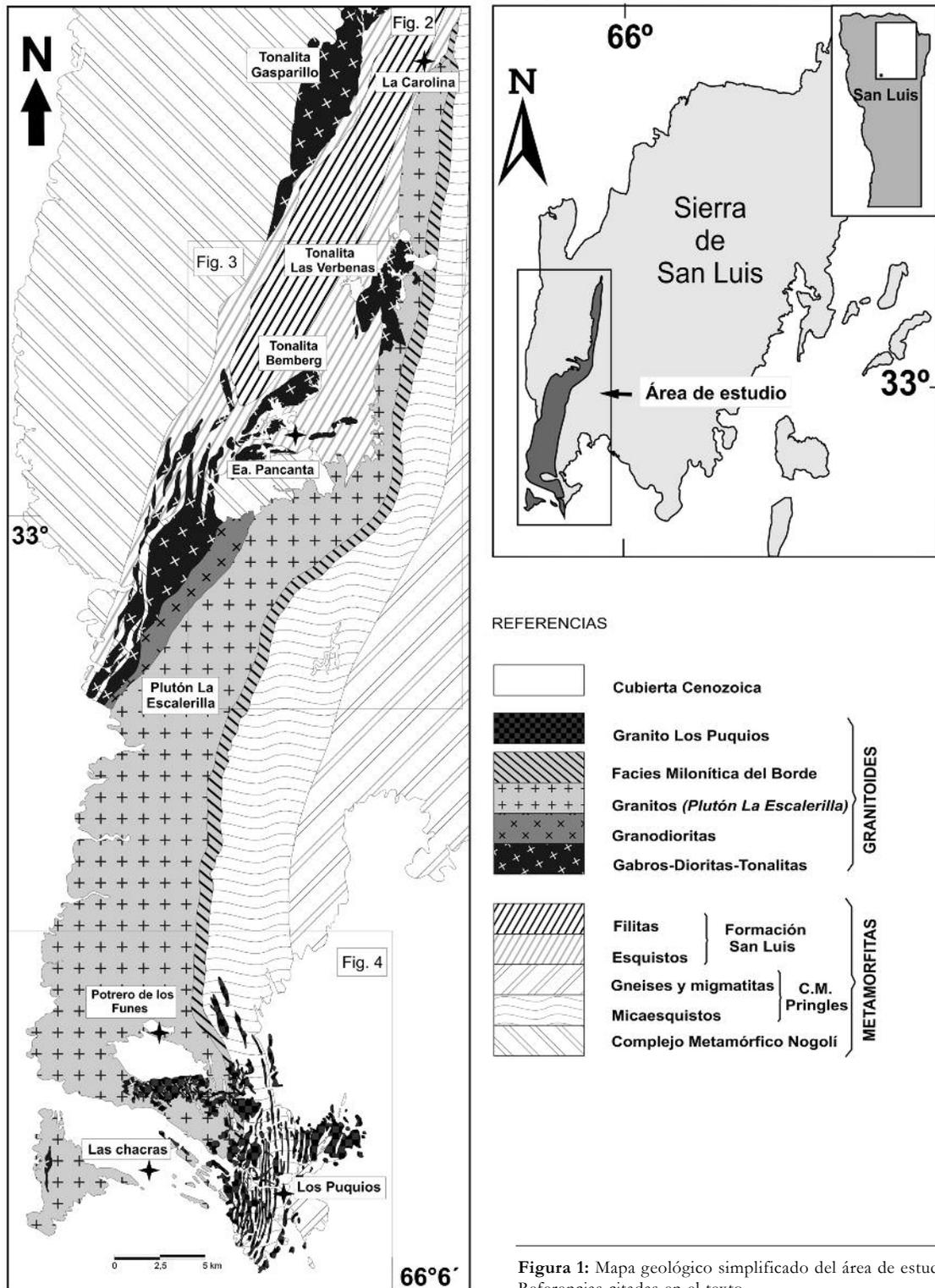


Figura 1: Mapa geológico simplificado del área de estudio. Referencias citadas en el texto.

de dimensiones variables con planos axiales de rumbo NNE a NNO, que afectan a bancos intercalados de cuarcitas y esquistos, de poco espesor, correspondientes a la estratificación sedimentaria origi-

nal (S_{0pF}). Es visible generalmente en pliegues parásitos desarrollados en charnelas y flancos de pliegues decamétricos. Dicha superficie de deformación estuvo vinculada a un metamorfismo regional M_{1F}

que, en algunos casos, probablemente fue acompañado por la intrusión del Granito La Escalerilla que, debido a un emplazamiento forzado, desvía y distorsiona a las estructuras pre-famatinianas en las adya-

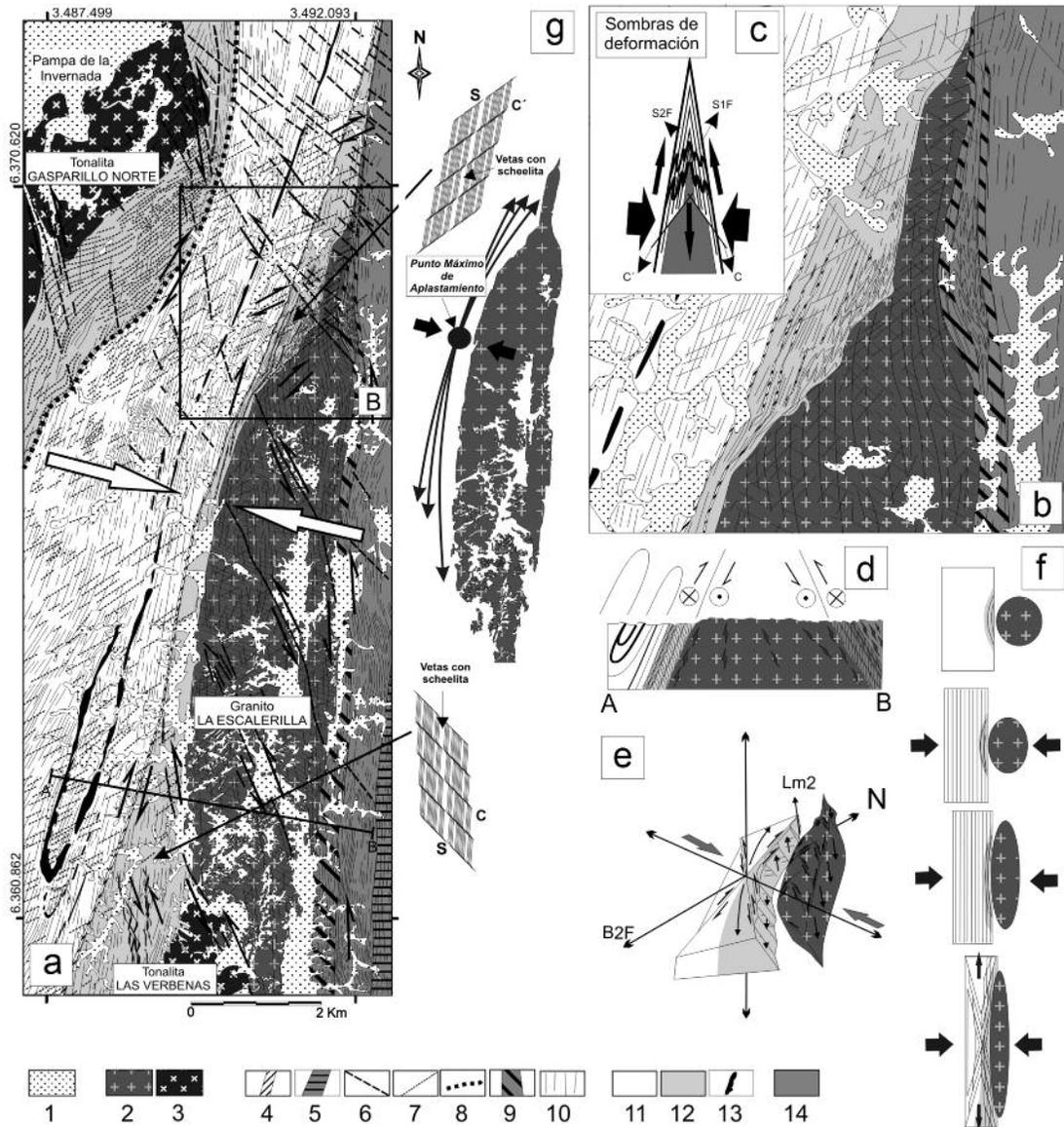


Figura 2: a) Mapa geológico estructural del sector norte del Granito La Escalerilla: 1) Cobertura Cuaternaria. 2) Granito La Escalerilla. 3) Tonalitas. 4) Faja de cizalla Pancanta-La Carolina. 5) Faja de cizalla La Arenilla. 6) Fajas de cizallas discretas y sintéticas al borde oriental del Granito La Escalerilla . 7) Fajas de cizalla antitéticas al borde oriental del Granito La Escalerilla . 8) Faja de cizalla Gasparillo. 9) Faja de cizalla del borde oriental del Granito La Escalerilla . 10) Superficie metamórfica principal (S2). 11) Filitas de la Formación San Luis. 12) Esquistos de la Formación San Luis. 13) Metavulcanitas ácidas de la Formación San Luis. 14) Micaesquistos del Complejo Metamórfico Pringles; b) detalle de la culminación norte del Granito La Escalerilla, nótese la morfología de “boudinage” del Granito La Escalerilla en este sector; c) croquis de la deformación para el extremo norte del Granito La Escalerilla ; d) perfil geológico esquemático; e) bloque diagrama del Granito La Escalerilla en el sector norte; f-g) modelos de deformación para Granito La Escalerilla en el sector norte.

ciencias del mismo, antes del clímax, resultado de un proceso simultáneo de intrusión-deformación por presión de fluido (Bateman 1984).

La segunda superficie de foliación S_{2F} , de rumbo NNE es la más importante, se formó en respuesta a los principales esfuerzos famatinianos, generando una foliación por aplastamiento, tanto del sector de estudio como a lo largo de toda la si-

erra de San Luis. El grado metamórfico alcanzado para el metamorfismo regional dinamo-térmico (M_{2F}) es variable desde facies esquistos verdes a granulitas (Hauzenberger *et al.* 2001, Ortiz Suárez y Casquet 2005). Afecta a todas las unidades metamórficas del área y a todos los granitoides a excepción del granito Los Puquios. La estructura S_{2F} genera en la Formación San Luis, un plegamiento iso-

clinal con ejes de dirección B_{2F} $340^{\circ}/40^{\circ}$ aproximadamente (Morosini *et al.* 2006b). La S_{3F} es localizada y no penetrativa, se desarrolla hacia el final del ciclo Famatiniano, está representada por una crenulación de rumbo NNE a NNO con fuerte buzamiento hacia NO en el Complejo Metamórfico Pringles y NE en los esquistos de la Formación San Luis. Se superpone a la superficie S_{2F} y está asociada a la

generación de milonitas y sobrecorrimientos con planos N-S y fuertes buzamientos hacia el E en los esquistos del Complejo Metamórfico Pringles y hacia el O en los esquistos de la Formación San Luis. Dichas superficies son interpretadas como producto de un metamorfismo dinámico M_{3F} que retrograda a M_{2F} , con lineaciones minerales L_{3F} hacia el SE y SO respectivamente, con ángulos variables (Fig. 6e). Junto a esta deformación se generan estructuras SC y SC', como producto del acomodamiento espacial de las metamorfitas que envuelven a los plutones del área, al alcanzarse el máximo nivel de acortamiento.

En el área de estudio, la Formación San Luis ha sido dividida de acuerdo al grado metamórfico y a su estructura en dos subunidades, una denominada "filitas", conformada por meta-pelitas, meta-areniscas, meta-conglomerados, y meta-diques ácidos, de bajo grado metamórfico, y otra denominada "esquistos", compuesta por esquistos micáceos, cuarcitas y meta-vulcanitas ácidas, con un grado metamórfico mayor.

La diferencia entre estas dos subunidades está dada por: a) los esquistos presentan paragénesis compuesta por Qtz + Pl + Ms + Bt ± Grt, mientras que las filitas por Qtz + Ms + Chl, sin alcanzar generalmente la zona de la Bt (abreviaturas de minerales de Kretz 1983). b) las filitas nunca limitan directamente con los cuerpos plutónicos, por lo que se interpreta que solo los esquistos, recibieron el aporte térmico de los intrusivos del área. Y c) los esquistos, a diferencia de las filitas, presentan claramente dos superficies de deformación, la primera de ellas probablemente vinculada al emplazamiento de los plutones, debido al desarrollo de aureolas tectónicas.

EL GRANITO LA ESCALERILLA

El Granito La Escalerilla es un cuerpo laminar, de unos 52 km de largo y 2 a 6 km de ancho, que en su extremo norte se adelgaza hasta desaparecer entre rocas

metamórficas, hacia el sur, en cambio, alcanza su máximo espesor y es cubierto por sedimentos cuaternarios. En la región central se curva formando una estructura monoclin. La edad del Granito La Escalerilla ha sido determinada en 403 ± 6 Ma U-Pb SHRIMP en circón, en la zona sur (Sims *et al.* 1998), y 507 ± 24 Ma U-Pb convencional en circón (von Gosen *et al.* 2002) en la región norte.

La roca de caja del Granito La Escalerilla esta formada por distintas unidades metamórficas e intrusivos cuya relación no es clara. Las rocas metamórficas corresponden a diferentes unidades, al este se reconoce el denominado Grupo Micaesquistos (von Gosen 1998), perteneciente a la zona de más bajo grado del Complejo Metamórfico Pringles de Sims *et al.* (1997). En su margen noroccidental se encuentran los esquistos de la Formación San Luis, de más bajo grado. En la zona de la inflexión se observan migmatitas, gneises y esquistos fuertemente inyectados que se atribuyen a una escama del Complejo Metamórfico Nogolí y cuya relación con las demás unidades no es aún bien conocida (Fig. 1).

En la región norte, así como en el sector centro occidental se observan rocas tonalíticas y gabros, mientras que al sur es intruido por otro granito denominado Los Puquios (Morosini y Ortíz Suárez 2005a).

ESTRUCTURA DEL GRANITO LA ESCALERILLA

Las estructuras presentes en el Granito La Escalerilla se pueden dividir en cuatro grupos (Fig. 5): a) foliación interna, b) cizalla dúctil del margen oriental, c) cizallas dúctiles internas y d) fracturas extensionales.

Foliación interna: es la estructura más evidente reconocida posee un rumbo submeridiano, es particularmente marcada en las zonas de borde, y sectores norte y sur, mientras que en la zona de la inflexión se hace menos notoria curvándose levemente hacia el E (Figs. 3a y 6a y b). Está definida por la orientación de micas y fenocristales de feldespato potásico indicando

un origen predominantemente magmático. La lineación mineral no es clara y varía en un amplio rango, aunque predomina de alto ángulo hacia el SO y SE (Fig. 6e).

Cizalla dúctil del margen oriental: Posee un espesor de aproximadamente 200 m hacia el interior del cuerpo (von Gosen 1998 b, Vinciguerra 1999) (Figs. 1 y 2). Se generan milonitas con una orientación promedio N10°E, que se caracterizan por presentar una grosera estructura S-C con porfiroclastos tipo sigma de microclino, con colas de presión y bandas de cuarzo formando estructuras de tipo *pinch and swell*. Las lineaciones generalmente hunden al SE, con ángulos variables. Los indicadores cinemáticos sugieren movimientos inversos con componente sinistral (von Gosen 1998). El análisis de las microestructuras muestra importante recristalización de feldespato potásico; biotita, cuarzo y muscovita totalmente recristalizados, y plagioclasa deshomogenizada con formación de albita y oligoclasa (Morosini *et al.* 2009), lo que indica que el cizallamiento se habría generado a temperaturas elevadas, tal vez mayores a 600 °C de acuerdo a criterios de Simpson y De Paor (1991). Steenken *et al.* (2008) interpretan, para estas rocas, condiciones de deformación superiores a los 500 °C.

Cizallas dúctiles internas: Dentro del cuerpo se halla un sistema conjugado de fajas de cizalla curvas, más evidente en la parte centro y norte, con espesores de alrededor de 50 m y longitudes no superiores a los 5 km. Dicho sistema está formado por un conjunto de orientación NNO, con alto buzamiento al ENE-OSO y movimiento sinistral (R), y otro NE con alto buzamiento al NO-SE y movimiento dextral (R'), ambas con lineaciones subhorizontales que indican baja componente inversa o directa según sea la dirección de buzamiento (Fig. 6c y d). Estas cizallas fueron comúnmente aprovechadas para el emplazamiento de venas de cuarzo. Las condiciones de la deformación están determinadas por la recristalización de cuarzo, biotita, y feldespato potásico en los bordes de sus respectivos cristales, asimismo la plagioclasa muestra deforma-

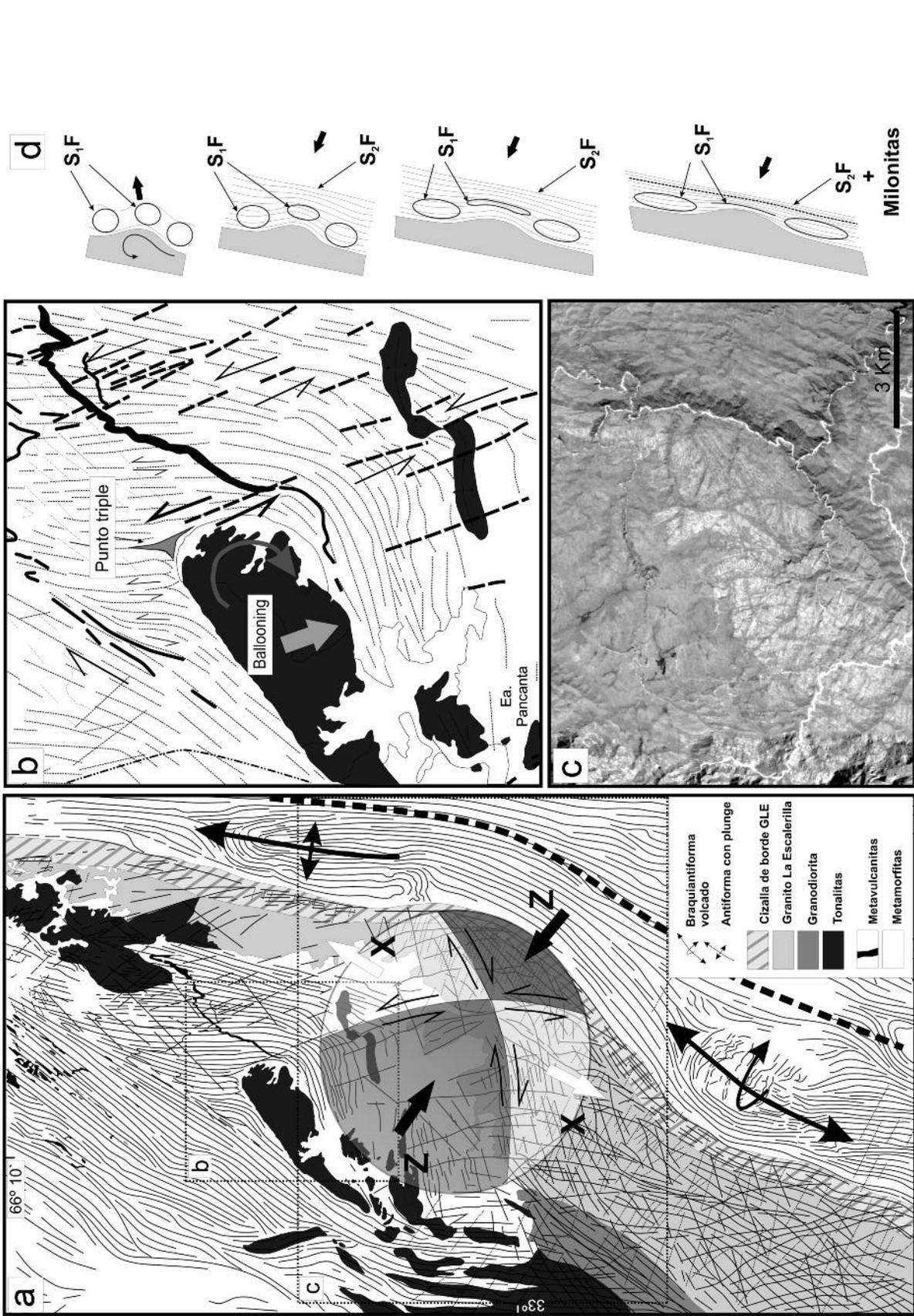


Figura 3: a) Mapa geológico estructural del sector central del Granito La Escalerilla (Granito La Escalerilla), modificado de Sánchez *et al.* (1996), Sato *et al.* (1996), von Gosen (1998b), Morosini *et al.* (2006). Nótese en la zona de curvatura el estilo de deformación representado a través de un diagrama de diedros rectos (vista hemisferio superior), mostrando el sistema conjugado de fajas de cizalla y los campos que contienen a los ejes de máximo acortamiento (Z) y alargamiento (X); b) detalle de la Tonalita Bemberg y la estructura asociada a su emplazamiento; c) imagen satelital de la zona de curvatura del Granito La Escalerilla, obsérvese al norte de la curvatura como el Granito La Escalerilla emplaza a las metamorfitas a través de un contacto intrusivo-magmático, a diferencia del borde oriental en donde el contacto es tectónico a través de una faja de cizalla; d) modelo de deformación de las metamorfitas que bordean al Granito La Escalerilla en el sector de la curvatura.

ción y recristalización por migración de límite de grano, lo que indica que la temperatura debería estar comprendida en torno a los 500 °C, de acuerdo a los criterios establecidos por Simpson y De Paor (1991).

Fracturas extensionales: Por otra parte se reconocen fracturas distensivas de orientación ONO, con buzamiento mayor a 50° al SO y NE, que en algunos casos poseen leve movimiento sinistral o dextral directo; estas fracturas son particularmente notorias en la zona centro y sur del cuerpo y generalmente están rellenas por facies aplopegmatíticas (Fig. 6g y h).

Interpretación de las estructuras del plutón La Escalerilla

Sector Norte (Fig. 2): en la zona norte del Granito La Escalerilla, Morosini *et al.* (2006 b) definieron un sistema conjugado de fajas de cizalla que se relacionan espacialmente de acuerdo a la ley de Anderson, estructuras de cizalla sintéticas de rumbo NNO y antitéticas de rumbo NE, que son generadas a partir de un esfuerzo de rumbo ONO y vinculadas a la faja de cizalla sinistral del borde este del Granito La Escalerilla. Si bien existe una componente sinistral, se considera que las rocas estuvieron sometidas a una componente normal del esfuerzo que fue considerablemente mayor a la componente tangencial, esto está evidenciado por lineaciones de alto ángulo en los planos de cizallas, dando lugar a menor desplazamiento transcurrente que inverso, tanto en la matriz de la roca como en los contactos reológicos donde las cizallas se acrecientan. En las metamorfitas se generan pliegues isoclinales perpendiculares al eje de máximo esfuerzo (σ_1), los planos axiales de los mismos tienen rumbos aproximadamente N15°E y corresponden a S_{1F} en las filitas de la Formación San Luis y S_{2F} en los esquistos de la Formación San Luis y micaesquistos del Complejo Metamórfico Pringles.

Luego del emplazamiento del Granito La Escalerilla en el sector norte, la interfase entre la subunidad de filitas y esquistos de la Formación San Luis, en el borde oc-

cidental del plutón, estuvo sometida al aplastamiento generado en el clímax metamórfico Famatiniano, dando lugar a una zona de cizalla inversa con una escasa componente de rumbo dextral, denominada faja de cizalla Pancanta-La Carolina (Ramos *et al.* 2006, Morosini *et al.* 2006b) producida por desacople estructural entre ambas unidades. Los mismos autores, consideran que la deformación de la roca de caja estuvo ligada, en principio, a la mayor competencia del Granito La Escalerilla y a su morfología, y que la diferencia reológica existente entre ambas litologías, condicionó la presencia de cizallas de diferentes direcciones en la estructura de escape del sistema, hacia el norte y sur del punto máximo de aplastamiento ilustrado en la figura 2g (SC' y SC respectivamente). La contemporaneidad entre éstas está evidenciada por la presencia de vetas portadoras de fluidos hidrotermales, con depósitos de scheelita (Fig. 2), que aprovecharon las estructuras de cizalla (Ramos *et al.* 2006).

Por otro lado, en el borde oriental del cuerpo granítico, las rocas metamórficas corresponden a los Micaesquistos del Complejo Metamórfico Pringles, cuyo grado metamórfico es mayor y corresponde a facies anfibolitas. Dicho contacto es rectilíneo debido a la presencia de una gran zona de cizalla dúctil mencionada anteriormente, que bisela a la morfología inicial del Granito La Escalerilla en el extremo norte, mediante un transporte tectónico de carácter inverso con una componente sinistral de mediano a alto ángulo.

El borde occidental del plutón, presenta forma débilmente lobulada, y se estima que antes de la deformación, el granito La Escalerilla en este sector era tal vez un plutón aproximadamente equidimensional y probablemente desvinculado del resto. El límite sur, estaría representado por un cambio de facies próxima a la tonalita Las Verbenas, lugar en el cual el cuerpo se hace extremadamente angosto (Fig. 1). Los resultados presentados por Morosini *et al.* (2008) muestran una clasificación de las diferentes facies correspondientes al

Granito La Escalerilla que atestiguan diferencias químicas notables entre las facies del sector norte y sur del mismo.

Sector Central: En la zona central, (Fig. 3) von Gosen (1998) propuso un modelo de intrusión y deformación del Granito La Escalerilla, debido a una compresión ONO-ESE, que da como resultado un esfuerzo transpresivo inverso-sinistral, produciendo la foliación del intrusivo, desarrollo de milonitas en el borde este y zonas de cizalla sinestrales de orientación NNO. Por su parte, Arrese *et al.* (2005), interpretaron que la inflexión del Granito La Escalerilla se produjo debido al desplazamiento diferencial del cuerpo, mediante la conformación de una cizalla dúctil E-O con componente del desplazamiento dextral, durante la culminación de la etapa compresiva del ciclo orogénico Famatiniano.

En este trabajo se descarta la posibilidad de una zona de cizalla E-O, ya que se ha observado que las cizallas sintéticas (C) pertenecientes al modelo propuesto por Arrese *et al.* (2005) no corresponderían a una cinemática dextral, sino no que forman parte de fracturas extensionales a veces con pequeños desplazamientos de carácter sinistral, que en la mayoría de los casos han sido rellenas por diques aplopegmatíticos intraplutónicos y sincrónicos con la deformación, se interpreta además que estas fracturas se disponen en forma paralela al eje de máximo acortamiento (Z) (Fig. 3). Por su parte se ha reconocido una estructura conjugada con cizallas sintéticas (R) sinestrales-inversas de rumbo NNO y buzamientos hacia el SE y antitéticas (R') dextrales-inversas con rumbos NE y buzamiento hacia el NO, mencionadas anteriormente por von Gosen (1998). Se ha determinado que ambos sistemas de cizallas se disponen normales entre sí, y conforman un verdadero sistema de diedros rectos asociado a transcurrencia dentro del cuerpo granítico, con campos de compresión en los cuadrantes NO-SE y de extensión en los cuadrantes NE-SO (Figs. 3 y 6c).

La diferencia entre los modelos propuestos anteriormente y éste radica en que no

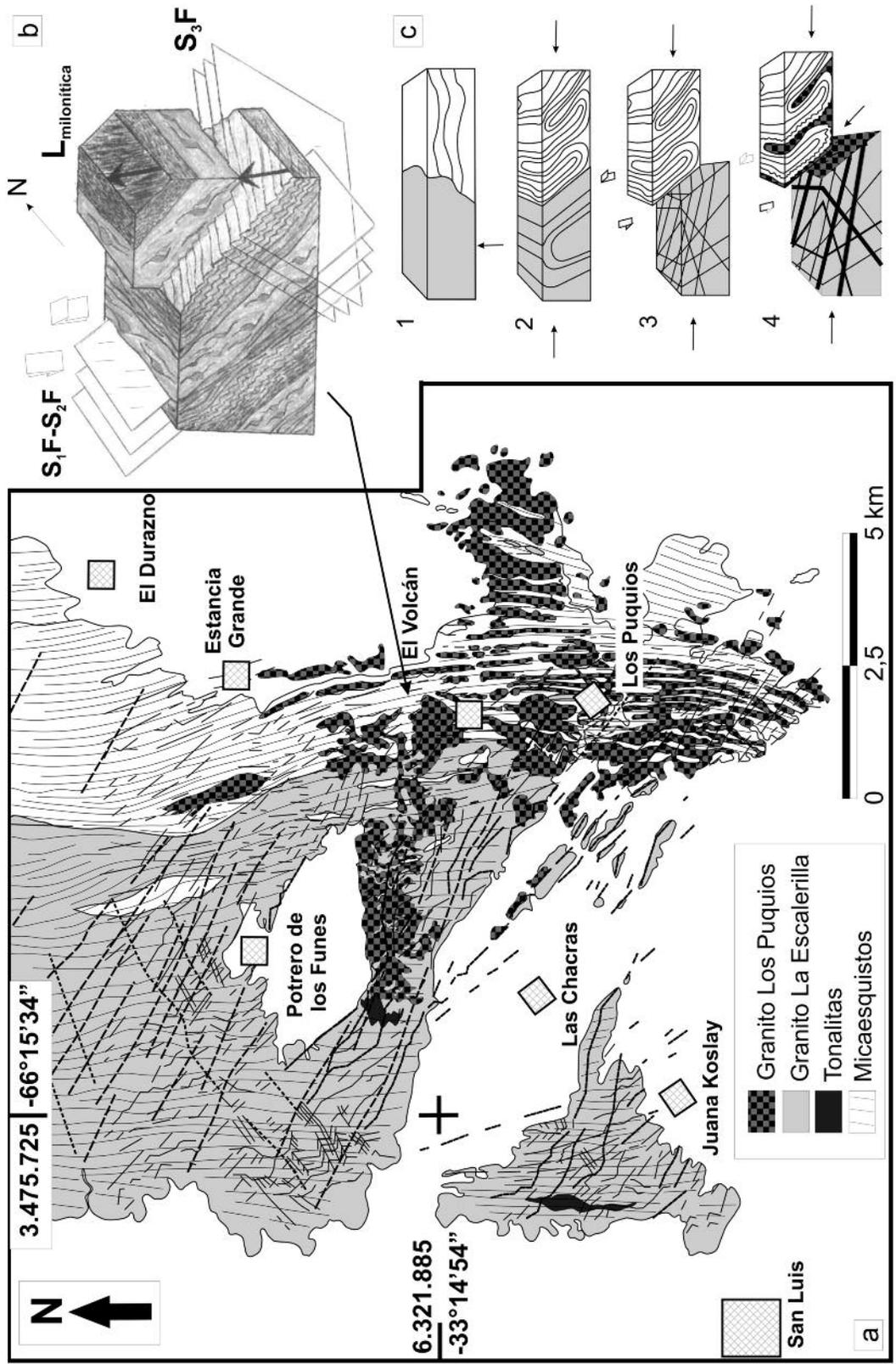


Figura 4: a) Mapa geológico estructural del sector sur del Granito La Escalerilla tomado de Morosini y Ortiz Suárez (2005a). Nótese que las estructuras de trazo grueso corresponden en su mayoría a fracturas extensionales de edad famatiniana, que en algunos casos han sido intrudidas por diques tabulares aplopegmatíticos correspondientes al granito Los Puquios, y luego reactivadas como un sistema de fallas directas, durante el ciclo Andino, conformando las depresiones de Las Chacras y Potrero de los Funes; b) bloque diagrama representativo de las estructuras halladas en las meta-morfitas adyacentes del borde oriental del Granito La Escalerilla; c) bosquejo de los diferentes estadios en la evolución: 1) Intrusión del Granito La Escalerilla pre a sinorogénico de acuerdo a la fase principal del ciclo Famatiniano. 2) Intrusión de diques y cuerpos menores del granito Los Puquios asociada a la zona milonítica del borde oriental del Granito La Escalerilla y al sistema conjugado de cizallas intraplutónico. 3) Tectónica de escape, comienzo de la exhumación en bloques, generación de un sistema conjugado de cizallas. 4) Intrusión de diques y cuerpos menores del granito Los Puquios asociada a la zona milonítica del borde oriental del Granito La Escalerilla y al sistema conjugado de cizallas intraplutónico.

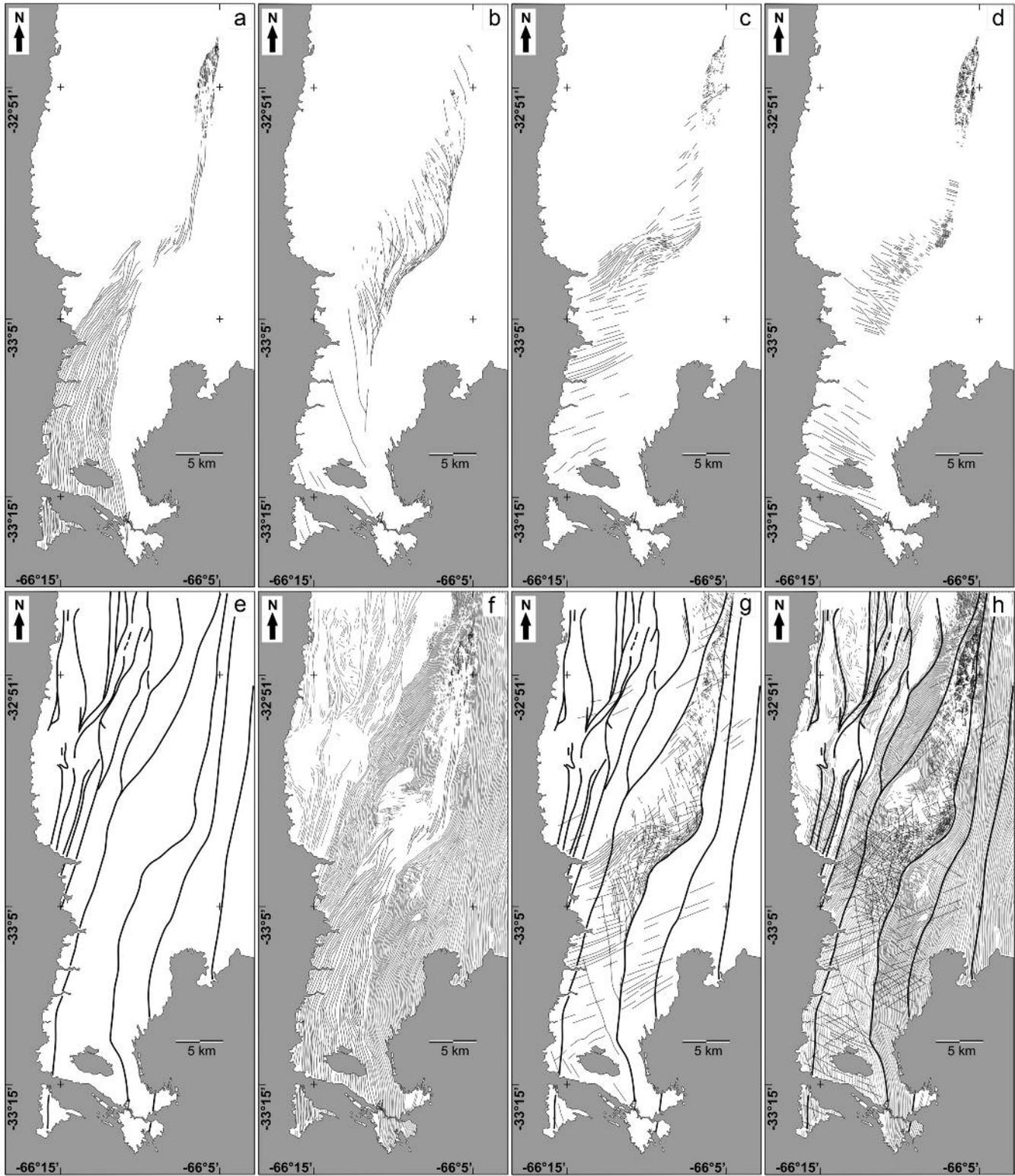


Figura 5: Representación de estructuras mediante filtrado por capas: a) Foliación imperfecta S_{2F} del Granito La Escalerilla ; b) estructuras R (*Riedel* sinestrasales sintéticas a la cizalla de borde oriental del Granito La Escalerilla) ; C), estructuras R' (*Riedel* dextrales antitéticas a la cizalla de borde oriental del Granito La Escalerilla); d) fracturas extensionales dentro del Granito La Escalerilla, la mismas suelen estar intruídas por diques aplopegmáticos tardío-magmáticos; e) fajas miloníticas meridionales a submeridionales; f) foliación S_{2F} en todas las rocas del área; g) estructura representada por tectónica de escape: fajas miloníticas, cizallas R y R'; h) muestra todas las estructuras en su conjunto. Cabe destacar que las estructuras del sector noroccidental correspondientes al Complejo Metamórfico Nogolí representadas en e, f, g y h fueron tomadas de González (2003).

se considera que el Granito La Escalerilla haya sido curvado durante la deformación, sino que se estima que la morfología del mismo ha sufrido poca variación de su forma original de emplazamiento, aunque sí se presume que el mismo ha tenido un acortamiento horizontal y engrosamiento vertical, acorde al desarrollo de geometrías de transpresión, con elipsoides de deformación aplastados u oblatos. En el sector noroeste de la curvatura del Granito La Escalerilla se preserva el contacto magmático con la roca de caja. En dicho sector, los esquistos y las rocas del Complejo Metamórfico Nogolí presentan una compleja estructura de interferencia dada por la conjunción de superficies de rumbo NNE con superficies E-O, pliegues ptigmáticos en esquistos inyectados, y una gran cantidad de diques tardíos-magmáticos de rumbo norte. Se interpreta que dichas características son acordes a la generación de una gran sombra de deformación ante los esfuerzos transpresivos ONO-ESE, condicionada por la morfología original y el contraste reológico del cuerpo granítico La Escalerilla. A partir de este modelo se interpreta también, que la generación de una de las cizallas (R) NNO de carácter sinestral, generada dentro del Granito La Escalerilla en la zona central, junto con la faja de cizalla La Carolina-Pancanta de carácter dextral, controlaron el emplazamiento de la tonalita Bemberg (Morosini *et al.* 2006a), dicho emplazamiento produjo la curvatura de la foliación S_{2F} desplazándola desde su rumbo general NNE a un nuevo rumbo E-O en el sector sur del mismo. Esto explica también, la ausencia en el plutón Bemberg de una deformación importante (Sánchez *et al.* 1996), normalmente bien desarrollada en el resto de los granitoides pre-orogénicos, y concuerda con la edad más joven de 468 ± 6 Ma (U-Pb SHRIM en circón, Sims *et al.* 1998), para la tonalita, respecto a la edad de 507 ± 24 Ma U-Pb convencional en circón (von Gosen *et al.* 2002) del Granito La Escalerilla. El diseño de intrusión está relacionado a la formación de un punto triple generado a raíz de la conjugación de las fajas de ciza-

llas mencionadas, y como consecuencia se generó progresivamente el espacio que fue intruido forzosamente a través de multifases, que sugieren que el mecanismo de intrusión fue el *ballooning* (Morosini *et al.* 2006a) (Fig. 3a y b).

Si bien los cuerpos tonalíticos han sido considerados anteriores a los granitos (Sato *et al.* 1996, Brogioni *et al.* 2005), el modelo propuesto sugiere que al menos en el caso de Bemberg no es así.

Asimismo esta propuesta acota la edad de la deformación alrededor de los 468 Ma que es la edad asignada a la intrusión. La edad del metamorfismo en las zona de gneises ha sido establecida en torno a los 460 Ma (Sims *et al.* 1998) lo que lleva a pensar que la principal fase de metamorfismo y deformación tiene un carácter compresivo de orientación ONO-ESE, que produce un efecto transpresivo sinestral, hecho mencionado por von Gosen y Prozzi (1998) y Ortiz Suárez y Casquet (2005).

Por otro lado, la presencia de una braquiantiforma con vergencia hacia el oeste y una antiforma con eje buzante al norte dentro del Grupo Micaesquistos, ubicados al sureste y noreste de la curvatura del Granito La Escalerilla respectivamente (Fig. 3a y d), con rumbos de plano axial NNE y caracterizadas por la presencia de intrusiones pegmatíticas ubicadas en ambas estructuras, son coherentes con el modelo de transpresión propuesto y la existencia de una zona más resistente que sobresale entre dichos pliegues, quedando delimitada una protuberancia del Granito La Escalerilla y la conformación de dos sombras de deformación ubicadas al norte y sur de la misma que conservan la estructura relíctica S_{1F} dentro de los Micaesquistos del Complejo Metamórfico Pringles.

Sector Sur: En la zona sur (Fig. 4), el Granito La Escalerilla ha sido intruido por diques correspondientes al granito Los Puquios (Morosini y Ortiz Suárez 2005a y b). Del análisis espacial de estas estructuras se desprende la relación de la ruptura del Granito La Escalerilla en el modelo de deformación propuesto. Los rum-

bos generales de estos diques representados en proyección estereográfica son aleatorios (Fig. 6g y h), pero asimismo sobresalen los de rumbo ONO, NO con buzamiento al NNE-SSO, NE-SO. El contacto entre los diques y el Granito La Escalerilla es neto debido a un fuerte contraste térmico, la marcada planaridad de los mismos indica que se intruyeron por medio de planos de fracturas de extensión dentro del Granito La Escalerilla, a temperaturas moderadamente bajas. La deformación, se produjo mediante fracturas distensivas en su mayoría sintéticas al borde oriental, de bajo y mediano ángulo y extensionales, todas ellas generadas por esfuerzos regionales ONO-ESE de carácter transpresivo. La edad devónica propuesta para el plutón Los Puquios (Morosini y Ortiz Suárez 2005a) plantea una contradicción que sugiere que se trata de una intrusión más antigua, o bien que aprovecha fracturas preexistentes que son reactivadas durante su ascenso.

Es útil remarcar que en el sector sur, el borde oriental del Granito La Escalerilla sufre una curvatura, cóncava hacia el norte, inversa a la de la zona central, que explicaría, bajo un régimen transpresivo sinestral, la generación de una distensión para este sector (Fig. 7).

Las depresiones de Potrero de Los Funes y Las Chacras en el extremo sur del área, reflejan el control de la estructura tardío-famatiniana, reactivada en el ciclo Andino (Fig. 4). Estas depresiones se asemejan mucho a aquellas producidas por distensión bajo un régimen transpresivo (*pull-apart* o *jogs* de dilatación).

CONCLUSIONES

La deformación del Granito La Escalerilla está caracterizada por la presencia de una foliación interna, una faja milonítica de rumbo submeridiano NNE en el borde oriental, y la generación de una peculiar estructura producida por tectónica de escape, controlada por cizallas conjugadas de tipo riedel sintéticas (R), riedel antitéticas (R') y fracturas extensionales, bajo un régimen transpresivo. Si bien esta de-

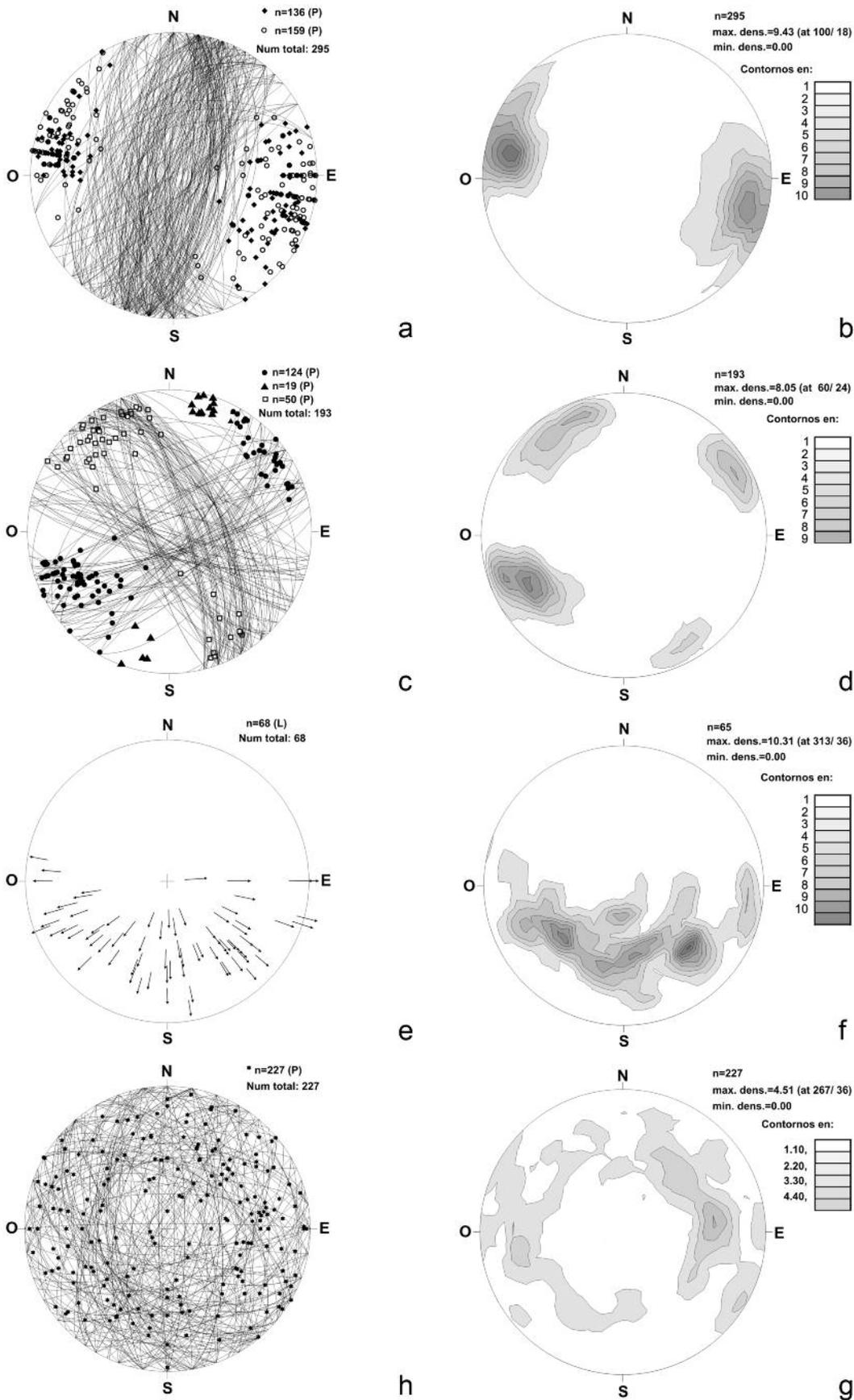


Figura 6: Representaciones estereográficas de las estructuras del área: a) Proyecciones de polos a plano de la foliación S_{2F} . Diamantes en negro: foliación imperfecta del Granito La Escalerilla. Círculos blancos: foliación S_{2F} en la roca de caja metamórfica; b) densidad de polos de la estructura S_{2F} ; c) proyecciones de polos a plano del sistema conjugado dentro del Granito La Escalerilla. Círculos negros: R-*Riedel*. Cuadrados negros: R'-anti-*Riedel*. Triángulos negros: fracturas extensionales; d) densidad de polos de la estructura conjugada de escape tectónico dentro del Granito La Escalerilla; e) proyecciones de lineaciones miloníticas; f) densidad de lineaciones miloníticas. La dispersión hacia el cuadrante SE está dada por planos que buzanan hacia el este, mientras que la dispersión de los polos hacia el cuadrante SO está dada por planos que buzanan hacia el oeste; g) proyecciones de polos a plano de diques tabulares aplogematíticos correspondientes al granito Los Puquios; h) densidad de polos de diques tabulares aplogematíticos correspondientes al granito Los Puquios. (Las proyecciones corresponden a vista hemisferio superior. La densidad está calculada por múltiplos de distribución aleatoria).

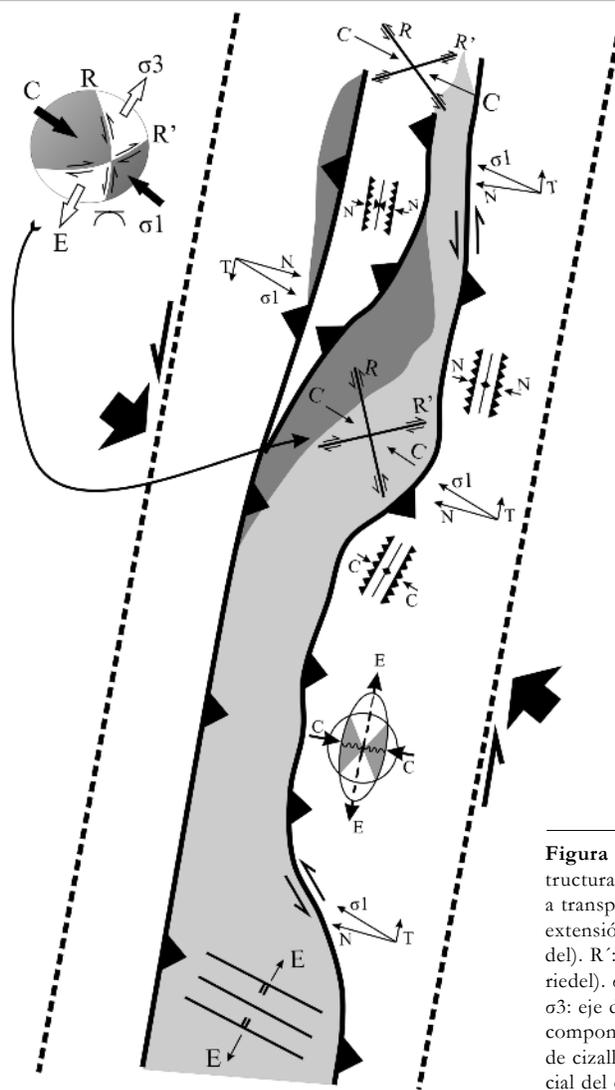


Figura 7: Croquis de los rasgos estructurales famatinianos asociados a transpresión. C: compresión. E: extensión. R: cizallas sintéticas (riedel). R': cizallas antitéticas (anti-riedel). σ_1 : eje de máximo esfuerzo. σ_3 : eje de mínimo esfuerzo. N: componente normal del esfuerzo de cizalla. T: componente tangencial del esfuerzo de cizalla.

formación es dúctil a escala de afloramiento, a gran escala se puede interpretar como una deformación frágil con una partición de la deformación o estructuración en bloques.

Se asume que el Granito La Escalerilla fue emplazado previamente al clímax tectono-metamórfico, cuya edad se encuentra en torno a los 460 y 480 Ma (Llambías *et al.* 1991, Sims *et al.* 1998). Por consiguiente, el estilo estructural de la deformación tardío-famatiniana, estuvo vinculado al contraste reológico entre el Granito La Escalerilla y las unidades metamórficas adyacentes. Esta deformación se asocia a la colisión del terreno Cuyania sobre el borde pampeano, la misma se generó inmediatamente después de que el sistema no admitiera mayor acorta-

miento por aplastamiento durante la culminación del clímax famatiniano, y muestra en el Granito La Escalerilla una evolución desde condiciones dúctiles de alta temperatura a condiciones frágiles más frías.

Si bien existe una componente real de esfuerzo tangencial sinistral a lo largo de todo el Granito La Escalerilla, el módulo de dicha componente es variable. Se estima que la deformación en muchos sectores y de acuerdo al zigzag de los bordes con respecto al eje de máximo esfuerzo (σ_1), ha sido producida prácticamente bajo esfuerzos normales puros. Por lo tanto, el estilo de deformación ha estado vinculado a la morfología de los elementos resistentes en el área, particularmente a la morfología del borde oriental

del Granito La Escalerilla.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Proyecto “Estudios del Basamento y Metamorfitas Mesozoicas de la Provincia de San Luis” del Sistema de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de San Luis. Al CONICET a través de una beca de Postgrado Tipo I y II. A la Fundación Banco Río, que mediante el otorgamiento de un subsidio, han permitido desarrollar los trabajos correspondientes a esta investigación. Se agradece el arbitraje del Dr. Roberto Martino, que ha permitido mejorar la calidad de este trabajo debido a sus valiosas recomendaciones.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Arrese, M. Delpino, S. y Kostadinoff, J. 2005. Granito La Escalerilla, Sierra de San Luis, Argentina: Modelo cinemático de deformación. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 433-444, La Plata.
- Bateman, R. 1984. On the role of diapirism in the segregation, and final emplacement of granitoid magmas. *Tectonophysics* 110: 211-231.
- Brogioni, N. Parrini, P. y Pecchioni, E. 2005. Petrología del magmatismo de arco pre-deformacional en el cordón del Realito y la Zona norte del Plutón La Escalerilla. Sierra de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60(3): 495-412.
- González, P. D. 2003. Estructura, metamorfismo y petrología del basamento ígneo-metamórfico de la sierra de San Luis entre Nogolí y Gasparillo. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata (inédita), 446 p., La Plata.
- González, P.D. Sato, A. Basei, M.A. Vlach, S. y Llambías, E. 2002. Structure, metamorphism and age of the Pampean-Famatinian Orogenies in the western Sierra de San Luis. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 51-56, Buenos Aires.
- Hauzenberger, C.A. Mogessie, A. Hoinkes, G. Felfernig, A. Bjerg, E.A. Kostadinoff, J. Delpino, S. y Dimieri, L. 2001. Metamorphic evolution of the Sierras de San Luis, Argentina: granulite facies metamorphism related to mafic intrusions. *Mineralogy and Petrology* 71:

- 95-126.
- Kilmurray, J. y Dalla Salda, L. 1977. Caracteres estructurales y petrológicos de la región central y sur de la sierra de San Luis. *Obra del Centenario del Museo de La Plata 4 (Geología):* 167-168.
- Kretz, R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68: 277-279.
- Linares, E. y Latorre, C.O. 1973. Nuevas edades radimétricas por el método K-Ar de rocas graníticas de Córdoba y San Luis. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 405-410, Buenos Aires.
- Llambías, E.J. Cingolani, C. Varela, R. Prozzi, C. Ortiz Suárez, A. Toselli, A. y Saavedra, J. 1991. Leucogranodioritas sin-cinemáticas ordovícicas en la sierra de San Luis. 6° Congreso Geológico Chileno, Actas: 187-191, Viña del Mar.
- Llambías, E.J. Sato, A.M. Ortiz Suárez, A. y Prozzi, C. 1998. The granitoids of the sierra de San Luis. En Pankhurst, R. y Rapela, C. (ed.) *The proto-Andean Margin of Gondwana*, The Geological Society, Special Publication 142: 325-341, London.
- López de Luchi, M. 1993. Caracterización geológica y emplazamiento del Batolito de Renca. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 4: 42-53, Buenos Aires.
- López de Luchi, M. Siegesmund, S. Wemmer, K. Steenken, A. y Naumann, R. 2007. Geochemical constraints on the petrogenesis of the Paleozoic granitoids of the Sierra de San Luis, Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 24: 138-166.
- Morosini, A. y Ortiz Suárez, A. 2005a. Geología y petrología del Basamento en el extremo sur de la Sierra Grande de San Luis. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 639-646, La Plata.
- Morosini, A. y Ortiz Suárez, A. 2005b. Modelo cinemático vinculado al emplazamiento del Granito Los Puquios. *Jornadas de Jóvenes Investigadores*. Universidad Nacional de San Luis, p. 95, San Luis.
- Morosini, A. Ortiz Suárez, A. y Ramos, G. 2006a. Modelo cinemático vinculado al emplazamiento de la Tonalita Bemberg, San Luis, Argentina. 11° Congreso Geológico Chileno, Actas 1: 279-282, Antofagasta.
- Morosini, A. Ortiz Suárez, A. y Ramos, G. 2006b. Modelo de deformación para el Sector Norte del Granito La Escalerilla. San Luis, Argentina: Un aporte a la Tectónica del Ciclo Famatiniano. 13° Reunión de Tectónica, Resúmenes: 44, San Luis.
- Morosini, A. Ortiz Suárez, A. y Ramos, G. 2008. Clasificación y Geotermometría de los granitoides Famatinianos del sector suroccidental de la sierra de San Luis, en función de la química de sus feldespatos. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 644, Buenos Aires.
- Ortiz Suárez A. Prozzi, C. y Llambías, E. 1992. Geología de la parte sur de la sierra de San Luis y granitoides asociados Argentina. *Revista de Estudios Geológicos* 48(5-6): 269- 277.
- Ortiz Suárez, A. y Casquet, C. 2005. Inversión metamórfica en el orógeno Famatiniano de la sierra de San Luis, Argentina. *Geogaceta* 38: 231-234.
- Prozzi, C. y Ramos, G. 1988. La Formación San Luis. 1 Jornadas de Trabajo de Sierras Pampeanas, Actas 1: 1, San Luis.
- Ramos, G. Ortiz Suárez, A. y Morosini, A. 2006. Las fajas de Cizalla Pancanta-La Carolina y su relación con depósitos de Wolframio. 13° Reunión de Tectónica, Resúmenes: 49, San Luis.
- Sánchez, V. Ortiz Suárez, A. y Prozzi, C. 1996. Geología y petrografía de la tonalita Bemberg, Provincia de San Luis. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 669-67, Buenos Aires.
- Sato, A. Ortiz Suárez, A. Llambías, E. Cavarozzi, C. Sánchez, V. Varela, R. y Prozzi, C. 1996. Los plutones pre-oclícos de la sierra de San Luis: arco magmático al inicio del ciclo famatiniano. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 5: 259-272, Buenos Aires.
- Sato, A. Gonzáles, P. y Llambías, E. 2003. Evolución del orógeno Famatiniano en la sierra de San Luis: magmatismo de arco, deformación y metamorfismo de bajo a alto grado. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58(4): 487-504.
- Simpson, C. y De Paor, D. 1991. Deformation and kinematics of high strain zones. *Annual GSA Meeting*. San Diego Structural Geology and Tectonics Division, Short Course Notes, 116 p., San Diego.
- Sims, J.P., Stuart-Smith, P.G., Lyons, P. y Skirrow, R. 1997. 1:250.000 Scale Geological and Metallogenetic Maps. Sierras de San Luis and Comchingones, Provinces of San Luis and Córdoba. Final report. Geoscientific Mapping of the Sierras Pampeanas Argentine- Australia Cooperative Project. Australian Geological Survey Organization, 123 p., San Luis.
- Sims, J., Ireland, T., Camacho, A., Lyons, P., Pieters, P., Skirrow, R., Stuart-Smith, P. y Miró, R. 1998. U-Pb, Th-Pb and Ar-Ar geochronology from the southern Sierras Pampeanas, Argentina: implications for the Paleozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin. En Pankhurst, R.J y Rapela, C.W. (eds.) *The Proto-Andean Margin of Gondwana*, The Geological Society, Special Publication 142: 256-281, London.
- Steenken, A., Siegesmund, S., Wemmer, K. y López de Luchi, M.G. 2008. Time constraints on the Famatinian and Achalian structural evolution of the basement of the Sierra de San Luis (Eastern Sierras Pampeanas, Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 25(3): 336-358.
- Vinciguerra, H.M. 1999. Geología y Petrografía del sector central del Granito de la Escalerilla. Provincia de San Luis. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Luis, (inédita), 87 p., San Luis.
- von Gosen, W. 1998a. The Phyllite and Micaschist Group with associated intrusions in the Sierras de San Luis (Sierras Pampeanas/Argentina)- structural and metamorphic relations. *Journal of South American Earth Sciences* 11(1): 79-109.
- von Gosen, W. 1998b. Transpressive deformation in the southwestern part of the Sierras de San Luis (Sierras Pampeanas/Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 11(3): 233-264.
- von Gosen, W. y Prozzi, C. 1998. Structural Evolution of the Sierra de San Luis (Eastern Sierras Pampeanas, Argentina): implications for the proto-andean Margin of Gondwana. En Pankhurst, R. y Rapela, C. (eds) *The Proto-Andean Margin of Gondwana*, The Geological Society, Special Publication 142: 235-258, London.
- von Gosen, W. Locke W. y Prozzi, C. 2002. New isotopic dating of intrusive rocks in the Sierra de San Luis (Argentina): implications for the geodynamic history of the Eastern Sierras Pampeanas. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 237-250.

Recibido: 2 de marzo, 2010

Aceptado: 3 de diciembre, 2010