

Análisis estructural y modelado digital de afloramiento del basamento austral de la Cuenca Neuquina: evidencias de deformación progresiva vinculada a cizalla dúctil

Micaela GARCÍA¹, Joaquín BUCHER¹, Manuel LÓPEZ¹, Daniela FUNES¹, Leandro D'ELIA¹, Andrés BILMES² y Juan FRANZESE¹

¹Centro de Investigaciones Geológicas, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de La Plata, La Plata.

²Instituto Patagónico de Geología y Paleontología, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Centro Científico Tecnológico CENPAT, Puerto Madryn.

Email: mgarcia@cig.museo.unlp.edu.ar

Editor: Fernando Hongn

RESUMEN

El basamento del sur de la Cuenca Neuquina está integrado por metamorfitas paleozoicas de alto grado metamórfico. En el presente trabajo la fábrica tectónica de estas rocas fue analizada a través de estudios de campo en localidades clave y técnicas de modelado digital fotogramétrico. La zona de estudio ha sido dividida en tres dominios estructurales diferenciados: oriental, central y occidental. El dominio oriental está definido por pliegues apretados (F_2) con plano axial de orientación NE y buzamiento al SE y ejes de pliegues inclinados 20° hacia el NE. El dominio central desarrolla un plegamiento F_3 de tipo abierto, sobre los F_2 , presentando planos axiales con orientación NE fuertemente inclinados al SE y ejes de pliegues inclinados 20° al SSO. El dominio occidental es definido por un plegamiento (F_3) apretado sobre los F_2 , con desarrollo de plano axial de orientación NNE y buzamiento principal de 70° al ESE y ejes de pliegues con inclinación de 10° al SE. En todos los dominios se ha reconocido una lineación L_m con una orientación general $N110^\circ$. Asimismo, se han registrado zonas de cizalla dúctil compuestas por bandas miloníticas en los tres dominios que cortan a las estructuras previas. Estas zonas presentan condiciones metamórficas de mediano grado con una cinemática principalmente inversa. Bandas de cizalla localizadas de bajo grado metamórfico se sobre imponen a las previamente mencionadas. Los pliegues y las zonas de cizalla muestran patrones geométricos compatibles con un avance progresivo de la deformación vinculado a contracción.

Palabras clave: Deformación dúctil, metamorfismo, milonitas, fotogrametría, Cuenca Neuquina

ABSTRACT

Structural and digital field model analysis of the southern basement of Neuquén Basin: progressive deformation linked to ductile shear. The basement from southern Neuquén Basin is integrated by deformed Paleozoic metamorphic rocks of high metamorphic grade. In this work the tectonic fabric of those rocks was analyzed through field studies and photogrammetric digital model in key localities. Three structural domains were differentiated in the study area: east domain, central domain and west domain. East domain is defined by isoclinal or tight folds (F_2), with NE axial planes tilted to SE and fold axis plunged 20° to NE. Central domain develops open folds (F_3) above F_2 , with sub vertical NE axial planes and fold axis plunged 10° to SSW. Finally, the west domain is defined by tight folds (F_3) developed over F_2 , with NNE axial planes tilted 65° to ESE and fold axis plunged 20° to SE. Moreover, in all domains there were recognized a penetrative mineral lineation (L_m) with $N110^\circ$ general orientation. Likewise, discrete ductile shear zones characterized by mylonitic bands cut previous structures. The ductile shear zones present medium metamorphic grade with a mainly inverse kinematics. Localized shear belts of low metamorphic grade are imposed on those previously mentioned. The folds and shear zones exhibit geometric patterns compatible with a progressive deformation evolution associated to contraction.

Keywords: Ductile deformation, metamorphism, mylonites, photogrammetric, Neuquén Basin

INTRODUCCIÓN

El basamento de la Cuenca Neuquina está integrado por rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico que afloran fundamentalmente en la región sur de la cuenca (Cucchi *et al.* 1998). Sus afloramientos más extensos se ubican en el límite con el Macizo Norpatagónico, con el cual comparten similitudes litológicas y estructurales. Estudios previos desarrollados sobre estas rocas y sus equivalentes en el Macizo Norpatagónico muestran estructuras y fábricas superpuestas que han sido integradas dentro de evoluciones diversas. Las propuestas más ampliamente desarrolladas asocian las variaciones en la configuración y orientación de las estructuras de estos sectores a distintos eventos metamórficos y deformacionales, siendo menos abundantes los casos vinculados a una deformación progresiva dentro de un mismo evento (Dalla Salda 1989, Varela *et al.* 1991, Franzese *et al.* 1992, Franzese 1993, Cerredo y López de Luchi 1998, Giacosa *et al.* 2004, Von Gosen 2009).

En el presente trabajo se expone un análisis estructural detallado de las rocas de basamento aflorantes en las márgenes del arroyo Casa de Piedra, a unos 30 km de la localidad de Piedra del Águila, sur de la Cuenca Neuquina (Fig. 1), con el objetivo de determinar el grado metamórfico, las relaciones de corte entre las estructuras y la cronología relativa de las mismas dentro de un modelo evolutivo integrado. La adquisición y análisis de los datos se efectuó mediante la determinación de estaciones de muestreo y procesamiento clásico con diagramas estructurales, incorporándose la novedosa técnica fotogramétrica de modelado digital de afloramiento en 3D Structure from Motion-Multi-View Stereo (Sturm y Triggs 1996, Westoby *et al.* 2012, Bemis *et al.* 2014, Vollgger y Cruden 2016), con el fin de complementar las metodologías clásicas de relevamiento.

MARCO GEOLÓGICO

Las rocas ígneo-metamórficas analizadas en el presente trabajo han sido incluidas por diversos autores dentro del basamento de la Cuenca Neuquina (Franzese y

Spalletti 2001, Ramos *et al.* 2011a). Estas rocas componen el basamento más austral de la cuenca (Fig. 1) y presentan diferencias significativas con las unidades desarrolladas hacia el norte. Este rasgo ha sido atribuido a la presencia de un elemento cortical de primer orden (dorsal de Huincul) que corresponde al margen de la Patagonia durante los últimos estadios de la acreción de Gondwana (Mosquera *et al.* 2006, Ramos *et al.* 2011b). Específicamente, las unidades del basamento del área de estudio han sido incluidas en el umbral de Sañicó (Braccacini 1970, Ramos 1978), unidad morfoestructural representada por un pequeño macizo de basamento con estructura compleja y una delgada cobertura de sedimentitas mesozoicas.

Estratigráficamente, las unidades en estudio han sido integradas al "Basamento Cristalino" por Galli (1969) y dentro de las Formaciones Cushamen y Mamil Choique por Cucchi *et al.* (1998). Las rocas más antiguas corresponden a la Formación Cushamen (Volkheimer 1964) constituida por esquistos micáceos, filitas cuarzosas y metacuarcitas, las cuales se encuentran mayormente migmatizadas (Galli 1969). Inicialmente, la Formación Cushamen fue asignada al Proterozoico superior-Paleozoico inferior (Volkheimer 1964, Ravazzoli y Sesana 1977, Linares *et al.* 1988, Cingolani *et al.* 1991, Varela *et al.* 1991), mientras que estudios recientes le han asignado edades que van desde el Devónico al Pérmico (Duhart *et al.* 2002, Lucassen *et*

al. 2004, Hervé *et al.* 2005, Varela *et al.* 2005). La Formación Mamil Choique (Sesana 1968) integra a rocas plutónicas de distinta naturaleza que han sido divididas para la zona de Piedra del Águila en tres facies: granítica, porfiroide y deformada (Cucchi *et al.* 1998). La Formación Mamil Choique fue originalmente asignada al Proterozoico superior-Paleozoico inferior (Galli 1969, Sesana 1968, Ravazzoli y Sesana 1977) y recientemente al Carbonífero-Pérmico (Linares *et al.* 1988, Varela *et al.* 2005, Pankhurst *et al.* 2006, López de Luchi y Cerredo 2008). Ambas unidades fueron integradas dentro de una evolución estructural compleja, desarrollada como resultado de la superposición de tres eventos de deformación (Dalla Salda 1989, Varela *et al.* 1991). El primer evento ocurrió sincrónicamente con la principal fase metamórfica y se evidencia por el desarrollo de una foliación de rumbo aproximadamente E-O (N90°/30°S); el segundo evento generó una esquistosidad penetrativa NNO (N331°/70°E); y el tercer evento correspondería a un evento más tardío interpretado como un último episodio de deformación dúctil-frágil que generó fajas de cizalla de distribución regional con orientaciones NE (N49°/28°S) (Dalla Salda 1989, Varela *et al.* 1991).

METODOLOGÍA

Con el objetivo de desarrollar un análisis detallado de las rocas de basamento,

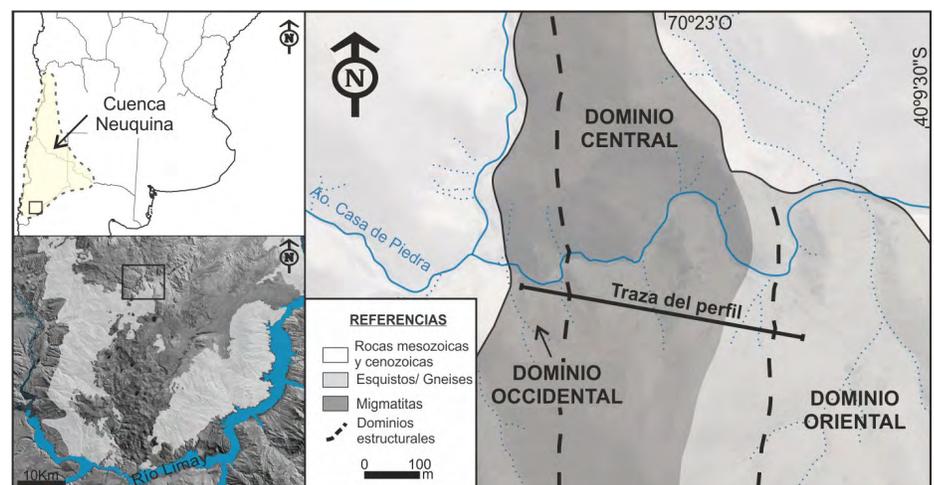


Figura 1. Exposiciones de basamento en la región austral de la Cuenca Neuquina, ubicación geográfica y mapa de la zona de estudio donde se muestra la distribución de las distintas unidades geológicas, así como los dominios estructurales diferenciados y la traza del perfil.

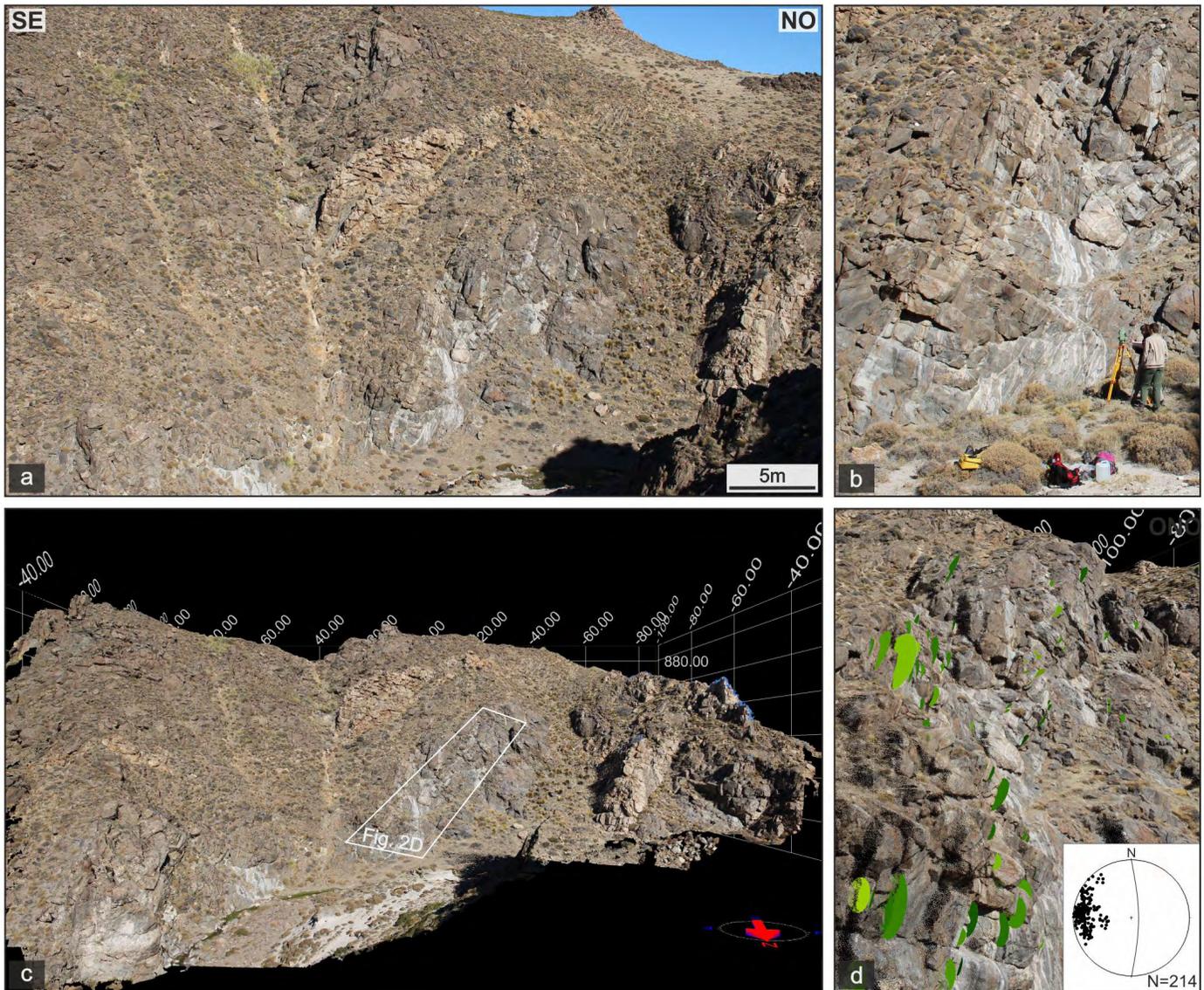


Figura 2. Desarrollo del modelado digital de afloramiento y toma de datos. a) Afloramiento sobre el arroyo Casa de Piedra, dentro del dominio occidental en el cual se llevó a cabo el modelado. Con coloraciones claras se pueden observar en el centro de la imagen y en el sector inferior derecho, diques leucocráticos deformados que cortan a las migmatitas; b) Posicionamiento de los puntos de control mediante el uso de Estación Total; c) Nube densa 3D del afloramiento visualizado con el programa VRGS. Disposición espacial del modelo georreferenciado a partir de los puntos de control de campo, donde se observa la orientación del modelo (Norte representado mediante la flecha roja), la grilla con distancias horizontales y verticales y la ubicación de la Fig. 2d; d) Adquisición de datos estructurales sobre el modelo digital y ploteo de éstos en diagramas de polos. Los círculos verdes sobre el modelo representan planos de foliación medidos (En este caso vinculados a la foliación S_m). Los resultados obtenidos a partir del modelo (foliaciones S_1 y S_m) fueron representados por polos en el diagrama estereográfico del sector inferior derecho. Se muestra a su vez, la orientación general de la foliación.

datos estructurales fueron adquiridos y analizados mediante la determinación de estaciones de muestreo y procesamiento clásico mediante redes estereográficas de proyección equiareal sobre el hemisferio inferior. Al relevamiento clásico se le sumó el desarrollo de modelos digitales de afloramiento en tres dimensiones (3D), mediante la técnica fotogramétrica *Structure from Motion-Multi-View Stereo* (Sturm y Triggs 1996) que permite desarrollar modelos 3D georreferenciados de

alta resolución espacial. Para la caracterización litológica de las rocas presentes, se obtuvieron muestras orientadas a partir de las cuales se realizaron secciones delgadas para ser analizadas en el microscopio óptico.

El levantamiento de los datos de campo se realizó mediante estaciones, localizadas en sectores clave para la toma de datos estructurales con brújula tipo Brunton y muestreo. Cada estación fue posicionada geográficamente con GPS y se realizaron

mediciones sistemáticas de rumbo e inclinación/buzamiento. Las mediciones se desarrollaron con un $N > 30$ para cada estación y se tomaron datos de foliaciones, lineaciones y elementos geométricos de los pliegues reconocidos.

El modelo 3D del afloramiento fue realizado en sitios de interés de difícil acceso sobre el cauce del arroyo Casa de Piedra (Fig. 2a). Se utilizaron 8 puntos de control elegidos en función al área y a la topografía del afloramiento (Carrivick *et al.* 2016),

donde se colocaron reflectores necesarios para la georreferenciación del modelado, de manera tal que pudieran ser visualizados posteriormente en el registro fotográfico. La posición de cada punto de control se obtuvo mediante estación total Stonex®, posicionada mediante GPS Trimble® (Fig. 2b). El registro fotográfico del afloramiento se realizó con una cámara Canon EOS REBEL T3i (distancia focal 35 mm; 18 Mpx) y se diseñó una trayectoria de obtención de fotografías en la cual se tomaron un total de 200 fotos modificando en cada toma el ángulo de cobertura de la foto y la distancia al afloramiento, asegurando superposiciones de más del 70% entre fotos sucesivas. El procesamiento digital de las imágenes para construir el modelo digital de afloramiento se realizó mediante el programa *AgiSoft PhotoScan® professional* bajo licencia académica. Se construyó una nube densa 3D del afloramiento y se georreferenció el modelo utilizando los puntos de control de campo (reflectores), con una raíz del error

cuadrático promedio (RMSE) de 0,07 metros.

El análisis estructural del modelo 3D de afloramiento (nube de puntos densa) se realizó mediante el programa *Virtual Reality Geological Studio (VRGS) 2.07©* bajo licencia académica (Figs. 2c y d). La adquisición de los datos se obtuvo mediante mediciones con un $N > 80$ en un área del orden de las estaciones de muestreo (Fig. 2d). Los datos obtenidos a través del modelo fueron validados posteriormente con los datos de campo. Todos los datos estructurales (datos de campo y del modelo digital de afloramiento en 3D) fueron tratados estadísticamente mediante el programa *Stereonet 9.3.2* (Allmendinger *et al.* 2013), a partir del cual se generaron diagramas de polos de proyección equiareal sobre el hemisferio inferior (Fig. 2d).

mento de la región austral de la Cuenca Neuquina se centró en el análisis detallado de las rocas metamórficas en afloramientos considerados claves en cuanto a ubicación y exposición, para la identificación y análisis de las estructuras. Los afloramientos se ubican en los márgenes del arroyo Casa de Piedra y consisten en exposiciones de esquistos, gneises y migmatitas, afectados por zonas de cizalla. En función de la configuración estructural se dividió al área en tres diferentes dominios: dominio oriental, dominio central y dominio occidental (Fig. 1), siendo los pliegues el rasgo estructural más característico.

Dominio oriental

Este dominio se caracteriza por la presencia de pliegues (F_2) isoclinales a apretados, de tipo similar (tipo 2, Ramsay 1967, Fig. 3a), que afectan a la foliación metamórfica (S_1). Estos pliegues se dan a diferentes escalas y desarrollan planos axiales con orientación promedio de

ESTRUCTURA

La caracterización estructural del basa-

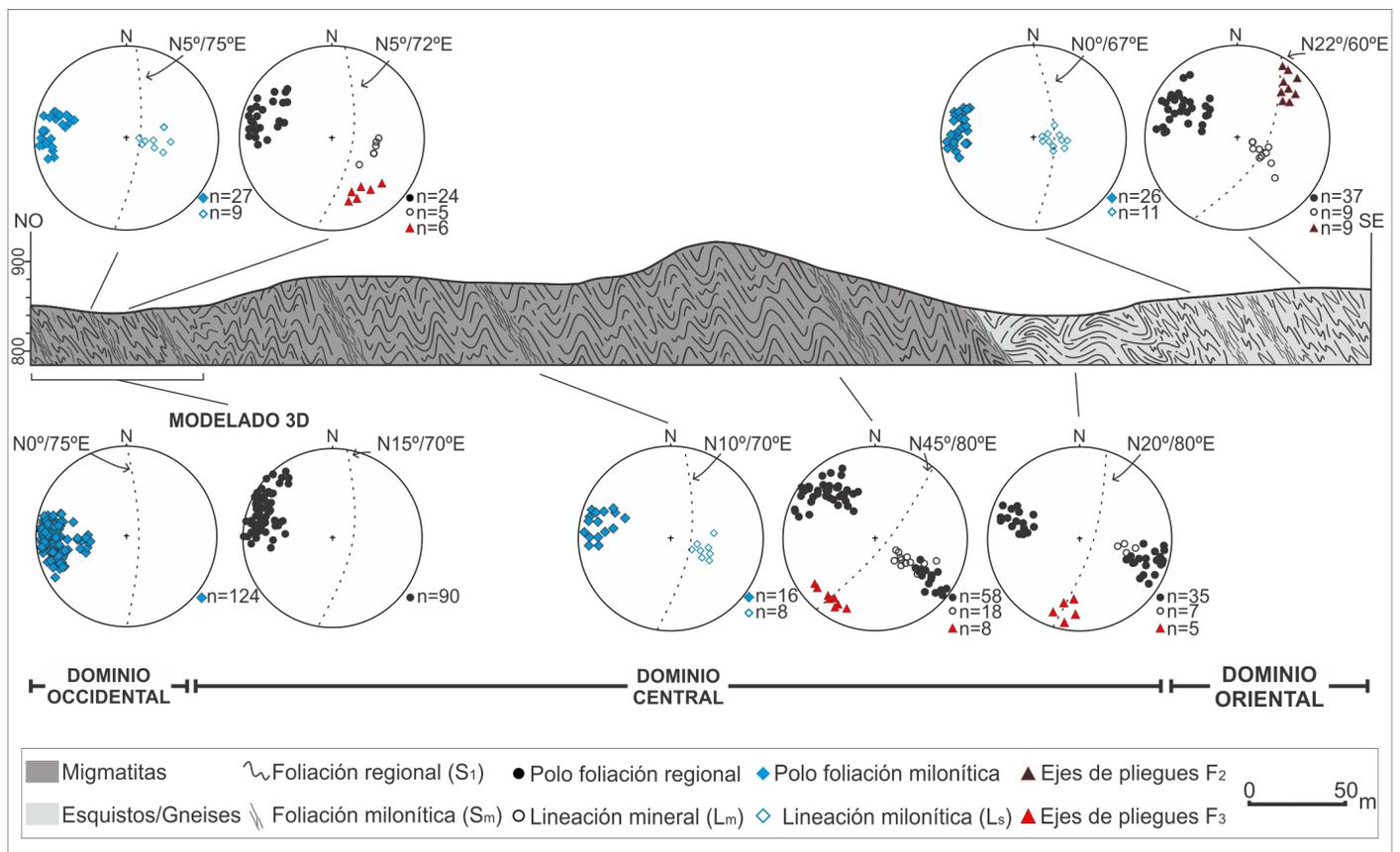


Figura 3. Sección perpendicular a las principales estructuras que muestra la distribución de las unidades litológicas, las estructuras reconocidas en los diferentes dominios y los diagramas de polos con los elementos medidos. Se muestran redes estereográficas de proyección equiareal sobre el hemisferio inferior donde se diferencian los polos de las foliaciones S_1 y S_m , las lineaciones L_m y L_s , los ejes de pliegues diferenciados en F_2 y F_3 y la orientación general de la foliación en cada caso.

N20°/60°E y ejes con dirección N30° a N55° y buzamiento entre 10° y 30° (Fig. 4). Las rocas que integran este dominio corresponden a esquistos cuarzosos y gneises. Los esquistos cuarzosos están compuestos por $Qz + Pl \pm Bt \pm Ms$ (abreviaturas según Whitney y Evans 2010), mientras que los gneises pueden dividirse en función de su composición en gneises biotítico-graníferos formados mayoritariamente por $Qz + Pl + Bt + Grt \pm Ms$ y gneises granífero-sillimaníticos conformados por $Qz + Pl + Bt + Grt + Sil$. Los esquistos y gneises presentes en esta región desarrollan una foliación regional (S_1) que transpone a la fábrica original (S_0). Esta foliación es definida por muscovita y biotita para los esquistos cuarzosos y por un bandeamiento composicional para los gneises. Este último está definido por capas alternantes de biotita-granate (\pm sillimanita) y de cuarzo-plagioclasa (Fig. 3b), con espesores que varían entre milímetros y centímetros. La foliación S_1 presenta orientaciones N8° a N53° con inclinaciones entre 35° y 80° al este. Sobre la foliación metamórfica (S_1) se midieron lineaciones minerales (L_m) definidas por la orientación de láminas de muscovita y biotita, prismas de sillimanita y granos elongados con direcciones N106° a N137° y buzamiento entre 40° y 75° (Fig. 4). La foliación metamórfica (S_1) es reconocida microscópicamente en los esquistos cuarzosos como una esquistosidad espaciada, definida por la orientación preferencial de la biotita y muscovita alternadas con capas ricas en cuarzo y plagioclasa (Fig. 5a). Los gneises presentan una textura granolepidoblástica de grano fino a medio con foliación definida a escala microscópica por la orientación preferencial de la biotita \pm sillimanita. El cuarzo se desarrolla como cristales elongados con bordes irregulares y presencia de subgranos. Las bandas de deformación en el cuarzo son abundantes. La plagioclasa muestra formas alargadas con bordes irregulares y alteración a sericita. La biotita es abundante en los gneises y presenta coloración pardo-rojiza. La sillimanita generalmente es fibrosa. Los granates constituyen porfiroblastos redondeados de grano fino. En algunos sectores, la foliación metamórfica regional es rotada y discontinuada por angostas zonas de cizalla con formación

de milonitas que presentan una foliación milonítica (S_m) con orientaciones N345° a N25° e inclinaciones entre 60° y 75° al

este (Figs. 3 y 4c). Sobre la foliación milonítica (S_m) se desarrolla una lineación de estiramiento mineral (L_s) de cuarzo con

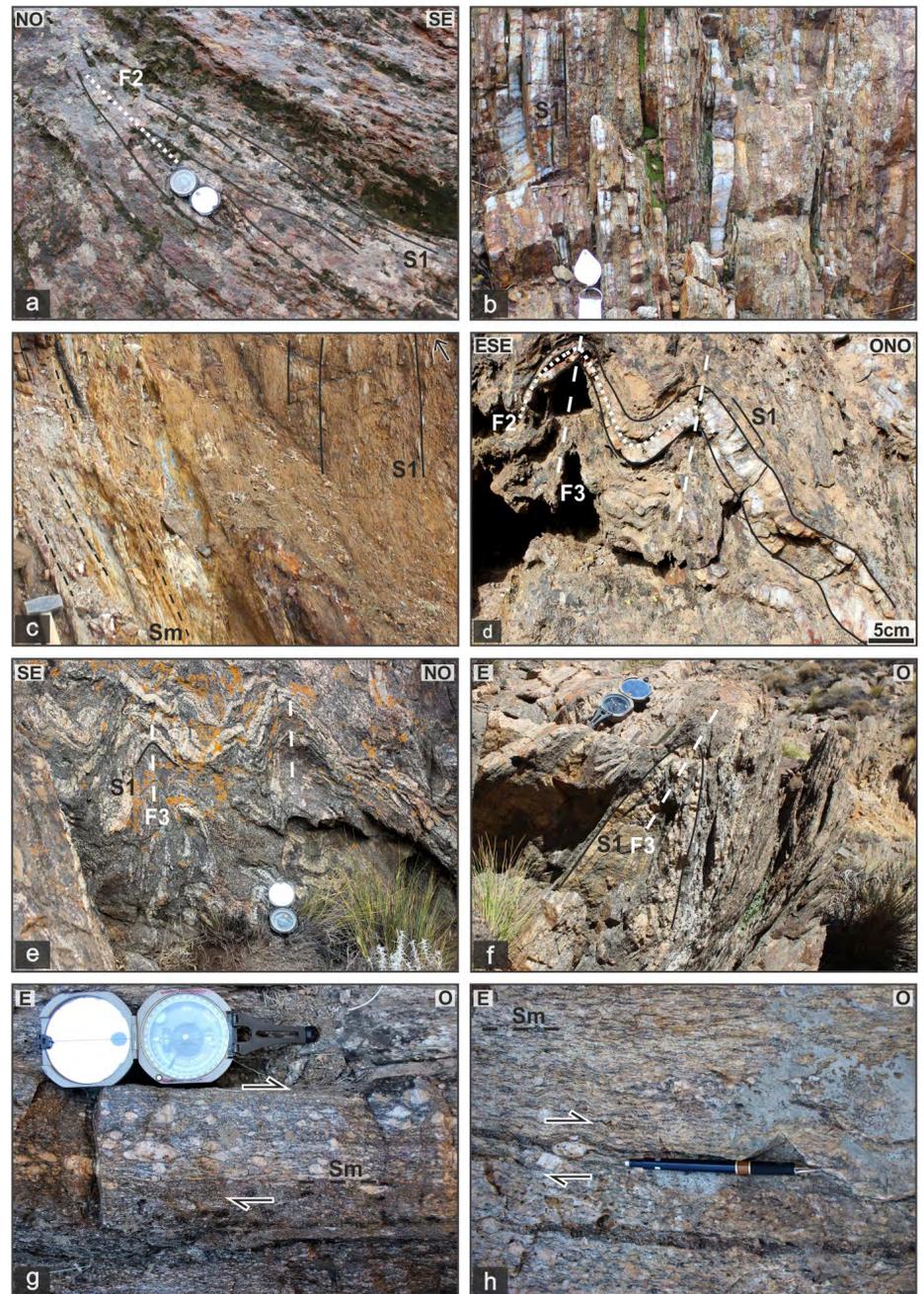


Figura 4. Fotografías de campo de las estructuras reconocidas en los tres dominios. a) Pliegue isoclinal (F_2) en el dominio oriental, con plano axial (línea discontinua de puntos) aproximadamente paralelo a los planos de foliación metamórfica (S_1); b) Foliación metamórfica (S_1) en gneises del dominio oriental. Descripción en el texto; c) Foliación metamórfica regional (S_1) cortada por angostas zonas de cizalla con desarrollo de foliación milonítica (S_m ; dominio oriental); d) Pliegue isoclinal (F_2) replegado por F_3 conformando una estructura de interferencia Tipo 3 en el dominio central. Con línea discontinua de puntos se muestra el plano axial de los pliegues F_2 , mientras que la línea discontinua de rayas muestra los planos axiales de los pliegues F_3 ; e) Migmatitas estromatíticas con bandeamiento (S_1) plegado por pliegues F_3 (dominio central). Con línea discontinua de rayas se muestran los planos axiales de los pliegues F_3 ; f) Pliegue F_3 apretado (dominio occidental), con plano axial (línea discontinua de rayas) aproximadamente paralelo a los planos de foliación metamórfica (S_1); g) Foliación milonítica (S_m ; dominio occidental) con cintas de cuarzo y porfiroclastos de feldespato que muestran un movimiento del tope hacia el oeste (flechas); h) Foliación milonítica (S_m ; dominio occidental) con cintas de cuarzo, porfiroclastos de feldespato y bandas de cizalla S-C que muestran un movimiento del tope hacia el oeste (flechas).

direcciones N75° a N125° y buzamiento entre 60° y 75°. Microscópicamente, la foliación S_m está definida por cintas de cuarzo, porfiroclastos con su dirección de alargamiento paralela al plano S_m y por láminas de biotita y muscovita orientadas en esta dirección. Los granates y las plagioclasas de los gneises se encuentran como pequeños porfiroclastos asimétricos, en algunos casos con formas sigmoides tipo *sigma* (Fig. 5b). Las plagioclasas en ocasiones desarrollan maclas acuñaadas. Los cristales de cuarzo se presentan alargados, conformando cintas, con escasos contactos suturados generados por recristalización dinámica (*bulging*) y abundantes contactos rectos con ángulos de 120° producto de una recristalización estática (Fig. 5b). Por otra parte, se reconoce una concentración de menor grado metamórfico definida por Chl + Ser + Opq ± Ms de pequeño tamaño en bandas locales sobreimpuestas paralelamente a la foliación milonítica S_m .

Las características observadas para este dominio permiten definir condiciones metamórficas de alto grado para el metamorfismo regional (Best 2003) que da lugar a la foliación S_1 , seguida por el desarrollo de pliegues isoclinales (F_2) con plano axial de rumbo NE-SO que deforman a la foliación metamórfica regional (S_1). A su vez, se reconocen angostas zonas de cizalla en condiciones metamórficas de mediano grado, que cortan a las estructuras definidas previamente. Una paragénesis mineral de bajo grado metamórfico se sobreimpone a las zonas de cizalla definidas previamente como de mediano grado metamórfico. La relación de corte entre las foliaciones S_1 y S_m y la orientación de la L_s definen una dirección de transporte hacia el ONO con movimiento sinistral subordinado para estas zonas de cizalla.

Dominio central

En este dominio se reconocen pliegues (F_3) que repliegan a las estructuras descriptas para el sector oriental (F_2 y S_1 , Fig. 3d). Los pliegues F_3 muestran ángulos interflanco entre 80° y 100° que definen un plegamiento abierto con variaciones en la amplitud y la longitud de onda (Figs. 3d y e). Presentan plano axial con rumbo aproximadamente NE con inclinaciones del orden de 80° al SE y ejes de pliegues con

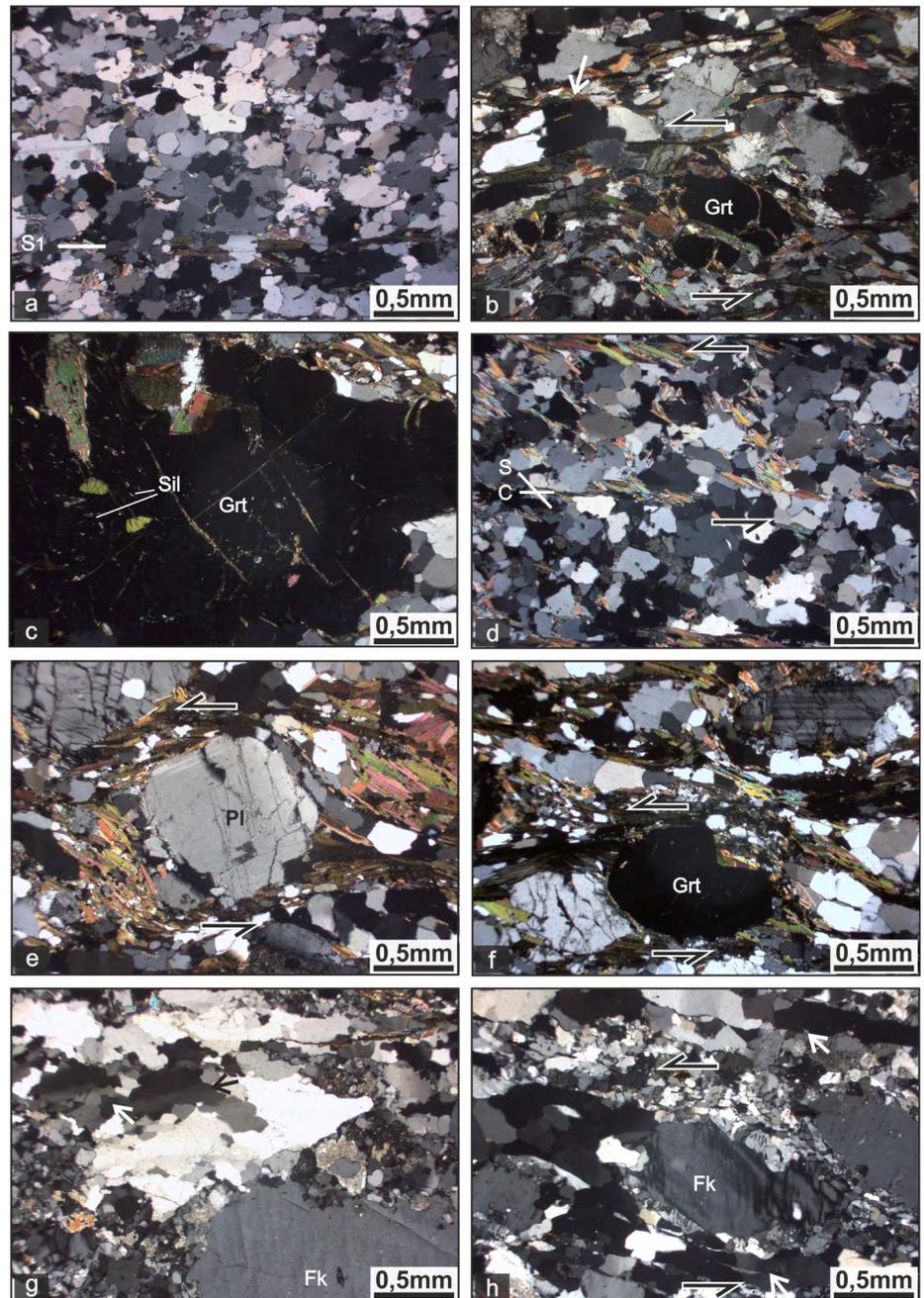


Figura 5. Microfotografías con nicoles cruzados. a) Esquistosidad espaciada en esquistos cuarzosos definida por la orientación preferencial de la biotita y muscovita alternadas con capas ricas en cuarzo y plagioclasa. Bordes irregulares en cuarzo y plagioclasas alteradas (dominio oriental); b) Porfiroclasto de granate (Grt) rodeado por láminas de biotita y bandas de cuarzo (flecha blanca) que definen la foliación milonítica (S_m), cuyo movimiento se muestra mediante flechas. En el sector inferior izquierdo se observa un porfiroclasto de menor tamaño alargado en la dirección de cizallamiento (zona de cizalla del dominio oriental); c) Detalle de un porfiroclasto de granate (Grt) en migmatitas estromatíticas no milonitizadas, con inclusiones de sillimanita y biotita. (dominio central); d) Fábrica S-C definida por superficies S o de aplanamiento (S_m) con cristales alargados de cuarzo y cristales de muscovita y superficies C o de cizallamiento con una relación angular de menor tamaño que da cuenta de la cinemática de estas rocas miloníticas (flechas; dominio central); e) Porfiroclasto de plagioclasa (Pl) rodeado por láminas de biotita que definen la foliación milonítica (S_m), cuyo movimiento se muestra mediante flechas. Maclas acuñaadas en plagioclasa (dominio central); f) Porfiroclasto de granate (Grt) rodeado por láminas de biotita y clorita y bandas de cuarzo que definen la foliación milonítica (S_m), cuyo movimiento se muestra mediante flechas. Cristales de feldespato fracturados (dominio central); g) Cristales elongados de cuarzo con bordes lobulados (flecha blanca), subgranos y bandas de deformación (flecha negra; dominio occidental); h) Cintas de cuarzo (flechas blancas) y porfiroclasto de feldespato potásico (Fk) con desarrollo de mirmequitas en los cuadrantes de acortamiento y leve recristalización periférica. Las flechas horizontales muestran el sentido del cizallamiento (dominio occidental).

dirección N190° a N235° y buzamiento entre 5° y 30° (Fig. 4). Este plegamiento desarrolla figuras de interferencia (tipo 3, Ramsay 1967).

En este dominio se identificaron esquistos cuarzosos y gneises de iguales características a los descritos para el dominio oriental (Fig. 3d) y migmatitas estromatíticas donde el bandeado y la orientación preferencial de la biotita definen la foliación S_1 (Fig. 3e). Las migmatitas en este sector desarrollan un bandeado a escala de centímetros, definido por una alternancia de leucosomas, mesosomas y melanosomas. Los leucosomas están compuestos por $Qz + Pl + Fk \pm Bt$, de grano grueso, coloración blanca a rosada y una textura granoblástica. Los melanosomas están compuestos por $Bt \pm Grt \pm Sil$ y desarrollan una textura lepidoblástica. Los mesosomas presentan coloraciones grisáceas y se componen de $Bt + Qz + Grt + Pl \pm Sil \pm Fk$ con textura lepidogranoblástica (Fig. 3e).

La foliación regional S_1 se dispone con orientaciones N15° a N65° con inclinaciones entre 40° y 85° al este y orientaciones N185° a N240° con inclinaciones entre 40° y 85° al oeste (Fig. 4). Sobre los planos de foliación metamórfica (S_1) se desarrolla una lineación mineral (L_m) definida por la orientación de láminas de muscovita, biotita y granos elongados con direcciones N95° a N120° y buzamiento entre 30° y 60° (Fig. 4). El cuarzo presenta formas irregulares y extinción ondulosa. La plagioclasa desarrolla maclas acuñaadas, en algunos casos zonación y están parcialmente fracturadas y alteradas a caolín y sericita. El feldespato potásico muestra extinción difusa, fracturas y se encuentra parcialmente alterado a argilominerales y sericita. La biotita se presenta como láminas pardo-rojizas que definen la foliación S_1 en conjunto con la sillimanita. El granate se encuentra conformando porfiroblastos con bordes irregulares y con inclusiones de sillimanita y biotita (Fig. 5c).

Al igual que en el dominio oriental, a lo largo de toda esta zona se reconocen sectores donde la foliación regional es afectada por angostas zonas de cizalla dúctil, caracterizadas por milonitas con una foliación milonítica (S_m) de orientaciones N350° a N30° con inclinaciones entre 45° y 80° al este (Fig. 4). Sobre la foliación

milonítica (S_m) se desarrolla una lineación de estiramiento del cuarzo (L_s) con direcciones N75° a N115° y buzamiento entre 40° y 60° (Fig. 4). En los esquistos cuarzosos se observa en ocasiones una fábrica S-C definida por las superficies S o de aplanamiento (S_m) con cristales alargados de cuarzo y cristales de muscovita y superficies C o de cizallamiento conformada por la misma asociación mineral, con una alta deformación por cizallamiento. La relación angular entre las superficies S (S_m) y C da cuenta de la cinemática de estas rocas miloníticas (Fig. 5d). En las migmatitas, la foliación milonítica S_m está definida por cintas de cuarzo, porfiroclastos con su dirección de alargamiento paralela a este plano y biotita (Figs. 5e y f). Las bandas de cuarzo se desarrollan como agregados poligonales o bien como granos alargados con uniones perpendiculares a los bordes (Fig. 5f). Las uniones triples con ángulos de 120° evidencian una fuerte recristalización estática localizada en sectores. Son abundantes las bandas de deformación en el cuarzo y presentan escaso desarrollo de contactos suturados producto de recristalización dinámica (*bulging*). Los granates y feldespatos (feldespato potásico y plagioclasa) se evidencian como porfiroclastos de varios tamaños, con formas ovoides y en ocasiones asimétricos con formas sigmoides tipo *sigma* (Figs. 5e y f). Los feldespatos muestran extinción ondulosa, formación de subgranos, maclas acuñaadas (en plagioclasas) y frecuentemente se encuentran fracturados (Fig. 5e). Los porfiroclastos de granate suelen presentar inclusiones de sillimanita. Por otra parte, al igual que en dominio oriental, se reconoce una paragénesis mineral de menor grado metamórfico definida por $Chl + Ser + Opq$ en bandas locales sobreimpuestas paralelamente a la foliación milonítica S_m . En función de las texturas y paragénesis previamente definidas, se reconocen condiciones metamórficas de alto grado para los gneises y las migmatitas estromatíticas. Este dominio se caracteriza por el replegamiento de las estructuras descritas para el dominio oriental (pliegues F_2). Esta nueva generación de plegamiento se caracteriza por desarrollar pliegues abiertos (F_3 ; posteriores al pico metamórfico regional) con plano axial aproximadamente NE, fuerte inclinación hacia el SE y ejes

sub-horizontales que repliegan a la foliación S_1 y a los pliegues F_2 . A su vez, se reconocen angostas zonas de cizalla en condiciones de mediano grado metamórfico, que cortan a las estructuras definidas previamente. Bandas localizadas de cizalla con bajo grado metamórfico se desarrollan y sobreimponen paralelamente a la foliación milonítica. La relación entre las foliaciones que definen las bandas de cizalla, la geometría de los porfiroclastos, la relación de corte entre las foliaciones S_1 y S_m y la orientación de la L_s definen una dirección de transporte hacia el ONO y movimiento inverso, con componente sinistral subordinada para estas zonas de cizalla.

Dominio occidental

En este dominio se observan a diferentes escalas pliegues apretados (F_3 ; Fig. 3f) que afectan a pliegues menores de similares características (F_2). Los pliegues F_3 se corresponden con los del dominio central, aunque se diferencian en que son apretados y presentan planos axiales aproximadamente paralelos a los planos de foliación metamórfica con orientación promedio de N5°/72° E y ejes con dirección N125° a N165° y buzamiento entre 20° y 40° (Fig. 4).

En este dominio se continúan las migmatitas estromáticas definidas para el dominio central, cuya composición y microestructuras se mantienen constantes. Son numerosos los diques leucocráticos, compuestos por $Fk + Qz + Pl \pm Bt \pm Grt \pm Ms$ que cortan a las migmatitas y que en su mayoría se encuentran deformados dúctilmente (Fig. 2a).

La foliación regional S_1 se define al igual que para el dominio central, por el bandeado de las migmatitas y la orientación preferencial de la biotita. La foliación S_1 presenta orientaciones N355° a N50° con inclinaciones entre 45° y 88° al este (Fig. 4). Sobre los flancos de los pliegues se midieron lineaciones minerales (L_m) definidas por la orientación de láminas de biotita y granos elongados con direcciones N90° a N134° y buzamiento entre 45° y 50° (Fig. 4).

Otra característica del presente dominio es que se encuentra fuertemente afectado por zonas de cizalla levemente oblicuas a la foliación regional S_1 y con formación

de rocas miloníticas. La orientación de las cintas de cuarzo, las láminas de biotita y la geometría de los porfiroclastos definen una foliación milonítica (S_m) bien desarrollada (Figs. 3g y h). Esta foliación (S_m) presenta orientaciones N340° a N20° con inclinaciones entre 5° y 50° al este (Fig. 3). Sobre la foliación milonítica (S_m) se desarrolla una lineación de estiramiento mineral (L_s) de cuarzo y feldespato con direcciones N75° a N95° y buzamiento entre 50° y 80° (Fig. 4). El cuarzo se muestra en cintas con cristales elongados de bordes lobulados y como pequeños cristales en la matriz (Figs. 5g y h). Los cristales contienen numerosos subgranos y amplio desarrollo de bandas de deformación (Fig. 5g). Se reconocen algunos granos lobulados con evidencias de recristalización dinámica (*bulging*; Fig. 5g) y contactos rectos con ángulos de 120° que evidencian el desarrollo de recristalización estática. Los feldespatos se presentan como porfiroclastos de diferentes tamaños y geometría tipo *sigma* (Fig. 3g), poseen extinción ondulosa, deformación lamelar y leve formación de subgranos. A demás, se observan maclas acuñaadas en plagioclasa y mirmequitas en los cuadrantes de acortamiento del feldespato potásico (Fig. 5h) que en algunos casos presenta una leve recristalización periférica. Las láminas de biotita se orientan paralelas a las foliaciones. Al igual que para los dominios oriental y central, se desarrollan bandas locales paralelas a la foliación milonítica con concentración de Chl + Ser + Opq ± Ms de pequeño tamaño.

El análisis del modelo digital de afloramiento de un sector de este dominio permitió la obtención más de 200 datos de rumbo e inclinación de las foliaciones. Se pudieron diferenciar las foliaciones asociadas a metamorfismo regional (S_1) de aquellas asociadas a zonas de cizalla (S_m) en función de sus rasgos texturales y a partir de su correlación con los datos de campo (Fig. 4). Por otro lado, a través del mapeo 3D de pliegues y relaciones de cortes, se identificaron y analizaron elementos geométricos de los pliegues, normalmente interpretables solamente sobre la base de la lectura de elementos geométricos en diagramas estereográficos clásicos. El dominio occidental muestra rasgos es-

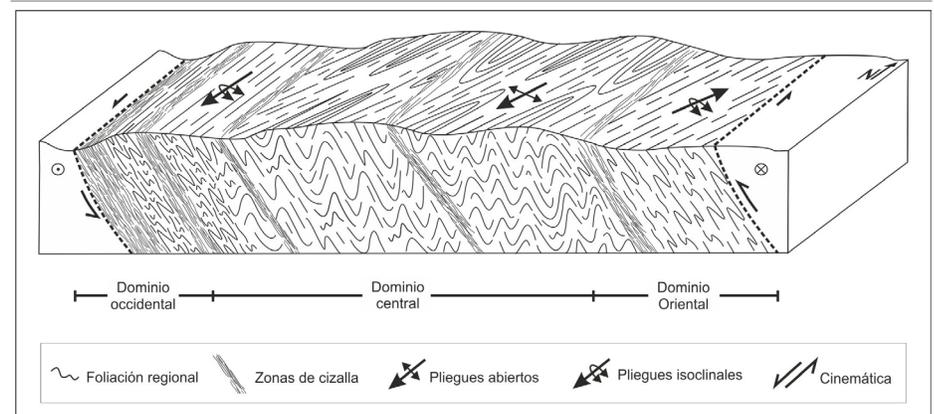


Figura 6. Block esquemático de la zona con cinemática principalmente inversa (orientación del tope hacia el oeste) asociada a deformación contraccional con una componente transcurrente subordinada.

tructurales en parte disímiles a los otros dominios. Presenta condiciones metamórficas de alto grado evidenciado por la presencia de migmatitas estromatíticas idénticas al dominio central. Sin embargo, se caracteriza por el desarrollo de pliegues apretados a diferentes escalas (F_3) con plano axial de orientación aproximadamente N-S y ejes levemente buzantes al SE. A su vez, presenta zonas de cizalla con orientaciones aproximadamente N-S que cortan con bajo ángulo a las estructuras previamente mencionadas. Las zonas de cizalla se desarrollan en condiciones de mediano grado metamórfico, a las que se les sobreimponen bandas localizadas de bajo grado metamórfico. La geometría de los porfiroclastos, la relación de corte entre las foliaciones S_1 y S_m y la orientación de la L_s definen una dirección de transporte hacia el ONO con una componente sinistral subordinada para estas zonas de cizalla.

DISCUSIÓN

El análisis estructural y petrológico de los esquistos, gneises y migmatitas de la región austral de la Cuenca Neuquina permitió identificar una paragénesis consistente con un alto grado metamórfico, típica de metamorfismo regional orogénico en facies de anfibolitas (Best 2003). La estructura penetrativa asociada al metamorfismo regional se caracteriza por la foliación metamórfica S_1 reconocida en todo el sector analizado. La foliación metamórfica S_1 es afectada por estructuras de plegamiento y zonas de cizalla dúctil

de manera no uniforme, dando lugar a la conformación de diferentes dominios. Las fases de plegamiento desarrolladas sobre la foliación metamórfica S_1 son posteriores al pico térmico del metamorfismo regional, presentan diferentes geometrías, se desarrollan bajo condiciones dúctiles y no desarrollan foliación penetrativa de plano axial (i.e., F_2 y F_3). La ausencia de desarrollo de foliación de plano axial se vincula a que no se dieron las condiciones necesarias para generar crenulación y transposición de una nueva foliación, posiblemente atribuibles a una menor magnitud de la deformación y del grado metamórfico. El dominio oriental es definido por pliegues isoclinales a apretados (F_2) con plano axial de orientación NE y buzamiento promedio de 60° al SE y ejes de pliegues inclinados 20° hacia el NE con una lineación mineral (L_m) que presenta inclinaciones de 55° al SE (Fig. 6). El dominio central, en cambio, desarrolla un plegamiento F_3 de tipo abierto, sobre los F_2 , con planos axiales de orientación NE fuertemente inclinados al SE, ejes de pliegues buzando 20° al SO y lineación mineral L_m con inclinaciones de 45° al SE (Fig. 6). El dominio occidental es definido por un plegamiento (F_3) apretado sobre los F_2 con desarrollo de plano axial de orientación NNE y buzamiento principal de 70° al ESE y ejes de pliegues levemente oblicuos a la lineación L_m con inclinaciones de 10° al SE (Fig. 6). Por último, en los tres dominios se reconocen (con mayor predominio en el occidental) zonas de cizalla dúctil con formación de foliación milonítica (S_m) que afectan a las estructuras descriptas previamente (S_1 , F_2 y F_3 ; Fig. 6). La foliación milonítica (S_m)

presenta una orientación N a NNE, buzamiento promedio de 70° al E y lineación de estiramiento mineral (L_s) con dirección ESE e inclinaciones de 65°.

Las microestructuras presentes en el cuarzo (bandas de deformación, recristalización dinámica por *bulging*, recristalización estática, cristales fuertemente alargados) junto con el desarrollo de formación de subgranos, maclas acuñadas, deformación lamelar, mirmequitas en los cuadrantes de acortamiento y leve recristalización periférica en feldespatos, indican condiciones metamórficas de mediano grado para las zonas de cizalla (Pryer 1993, Stipp *et al.* 2002, Passchier y Trouw 2005). Condiciones de bajo grado metamórfico son reconocidas en bandas de cizalla localizadas con concentración de sericita, clorita, minerales opacos y muscovita de pequeño tamaño, que se superponen a las rocas miloníticas desarrolladas bajo condiciones medias de temperatura.

La variación en la orientación y tipo de estructuras desarrolladas desde el dominio oriental al occidental muestra que los planos axiales y ejes de pliegues rotan progresivamente hacia un rumbo N-S ajustándose a los patrones rotacionales de las zonas de cizalla dúctil, con orientaciones aproximadamente N-S. De esta forma, la rotación simultánea de los planos axiales y ejes de pliegues hacia un paralelismo con el plano de cizalla (S_m) y la dirección de la cizalla (L_s), acompañado por el apretamiento de los pliegues, sugieren un modelo progresivo de la deformación (Ghosh y Sengupta 1984, Alsop 1992, Carreras *et al.* 2005) durante el desarrollo de plegamiento vinculado a un cizallamiento no pasivo de la foliación preexistente (S_1) y posterior localización de la deformación en las zonas de cizalla (Carreras 2001, Carreras *et al.* 2005). De esta manera, los dominios con plegamiento oblicuo a las zonas de cizalla se corresponden a un acortamiento no-coaxial asociado a las zonas de cizalla dúctil que generan una deformación heterogénea. Las estructuras definidas como producto de una deformación progresiva (F_2 , F_3 y S_m) muestran evidencias de una participación de la deformación que dio lugar a la distribución irregular de los componentes de la deformación y las estructuras resultantes, vinculadas a contracción. Finalmente, sobre la base de las condicio-

nes retrógradas registradas para bandas localizadas en las zonas de cizalla dúctil, se puede inferir que las etapas finales la deformación estarían asociadas a una localización de la deformación vinculada a exhumación (Carreras 2001, Oriolo *et al.* 2016).

Implicancias regionales

Tradicionalmente, las expresiones más australes del basamento ígneo-metamórfico de la Cuenca Neuquina fueron definidas como rocas metamórficas de bajo a alto grado con desarrollo de una estructura compleja definida por tres orientaciones de foliaciones producto de la superposición de tres eventos de deformación (i.e., D_1 , D_2 y D_3 , Dalla Salda 1989, Varela *et al.* 1991). Las evidencias estructurales, microestructurales y petrológicas presentadas en este trabajo permiten interpretar un desarrollo progresivo de una serie de estructuras de características y orientaciones diferentes (F_2 , F_3 y S_m) que responderían a un único evento de deformación. Expresiones algo más septentrionales del basamento de la Cuenca Neuquina, en el cordón de la Piedra Santa, muestran una serie de estructuras que también fueron asignadas a deformación progresiva en un único evento de deformación (Franzese 1993). Sin embargo, se presentan diferencias en la orientación de las estructuras y en el desarrollo de más de una foliación de plano axial (Franzese 1993).

Respecto a los resultados obtenidos y la implicancia que estos puedan tener con las unidades que constituyen el basamento del Macizo Norpatagónico, desarrollado inmediatamente al sur, similitudes litológicas y estructurales se reconocieron para la región aledaña de río Chico y Cushamen (Chubut), donde diferentes autores describen plegamientos con orientaciones N-S y zonas de cizalla paralelas a los mismos con desarrollo de foliación milonítica de características y orientaciones muy similares a las descritas en el presente trabajo. A diferencia de lo propuesto en el presente trabajo para la región austral de la Cuenca Neuquina, estos autores plantean una evolución de las estructuras asociadas a diferentes eventos de deformación (Franzese *et al.* 1992, Cerrado 1997, Cerrado y López de Luchi 1998, Von Gosen 2009).

CONCLUSIONES

La integración de los datos estructurales a diferentes escalas indica que parte de la historia deformacional del basamento de la región austral de la Cuenca Neuquina evolucionó a partir de un avance progresivo de la deformación vinculado a contracción. Las litologías (esquistos, gneises y migmatitas) en conjunto con las estructuras y fábricas (F_2 , F_3 y S_m) descritas para esta región presentan grandes similitudes con aquellas definidas a más de 150 km al sur, en la región de río Chico y Cushamen, en el Macizo Norpatagónico. Sin embargo, en contraposición a lo propuesto para dichos sectores, se infiere una deformación progresiva para el área de estudio, en forma similar a la registrada para diferentes sectores del basamento de la Cuenca Neuquina.

Es importante resaltar desde un punto de vista metodológico, que la utilización de la técnica fotogramétrica *Structure from Motion-Multi-View Stereo* para construir, analizar e interpretar modelos digitales de afloramiento en 3D, facilita la obtención de una gran densidad de datos estructurales, así como el análisis de elementos geométricos de pliegues. Sin embargo, vale destacar que su utilización es recomendada como complemento de las técnicas clásicas de levantamiento de datos, teniendo en cuenta sus limitaciones en cuanto a la medición de estructuras lineares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Lic. Joaquín Perez Mayoral por su invaluable apoyo durante las tareas de campo. Asimismo, agradecen los comentarios y sugerencias de los Dres. Roberto D. Martino, Sebastián Oriolo y Fernando D. Hongn que permitieron mejorar sustancialmente la calidad del manuscrito final. Este trabajo fue financiado con fondos del CONICET (PICT 2013-3249).

REFERENCIAS

- Allmendinger, R.W., Cardozo, N.C. y Fisher, D. 2013. Structural geology algorithms - Vectors and tensors. Cambridge University Press, 289 p., Cambridge.
- Alsop, G.I. 1992. Progressive deformation and

- the rotation of contemporary fold axes in the Ballybofey Nappe, north-west Ireland. *Geological Journal* 27: 271-283.
- Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., Thiele, S.T. y Bangash, H.A. 2014. Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology* 69: 163-178.
- Best, M.G. 2003. *Igneous and Metamorphic Petrology*, second edition. Blackwell Science, 729 p., Malden.
- Braccini, I.O. 1970. Rasgos tectónicos de las acumulaciones mesozoicas en las provincias de Mendoza y Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 25: 275-282.
- Carreras, J. 2001. Zooming on Northern Cap de Creus shear zones. *Journal of Structural Geology* 23: 1457-1486.
- Carreras, J., Druguet, E. y Grier, A. 2005. Shear zone-related folds. *Journal of Structural Geology* 27: 1229-1251.
- Carrivick, J.L., Smith, M.W. y Quincey, D.J. 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. Wiley Blackwell, 208 p., Oxford.
- Cerrodo, M.E. 1997. The metamorphism of Cushamen formation, Río Chico area. In *North Patagonian Massif, Argentina*. 8° Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 1236-1240, Antofagasta.
- Cerrodo, M.E. y López de Luchi, M.G. 1998. Mamil Choique Granitoids, southwestern North Patagonian Massif, Argentina: magmatism and metamorphism associated with a polyphasic evolution. *Journal of South American Earth Sciences* 11: 499-515.
- Cingolani, C., Dalla Salda, L., Hervé, F., Munizaga, F., Pankhurst, R.J., Parada, M.A. y Rapela, C.W. 1991. The magmatic evolution of northern Patagonia; new impressions of pre-Andean and Andean tectonics. En: Harmon, R.S. y Rapela, C.W. (eds.), *Andean Magmatism and Its Tectonic Setting*. Geological Society of America Special Paper 265: 29-44, Boulder.
- Cucchi, R., Espejo, P. y González, R. 1998. Hoja Geológica 4169-I Piedra del Águila, Provincias del Neuquén y de Río Negro. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Boletín 242, 74 p., Buenos Aires.
- Dalla Salda, L. 1989. La estructura del Basamento Cristalino del occidente del Macizo Norpatagónico, Argentina. *Comunicaciones* 40: 29-38.
- Duhart, P., Haller, M. y Hervé, F. 2002. Diamictitas como parte del protolito de las metamorfitas de la Formación Cushamen en Río Chico, provincias de Río Negro y Chubut, Argentina. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas Volumen 2: 97-100, El Calafate.
- Franzese, J.R. 1993. Deformación preandina del basamento del Cordón de la Piedra Santa, Neuquén. 12° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 11-20, Mendoza.
- Franzese, J.R. y Spalletti, L.A. 2001. Late Triassic-early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation and pre-break-up rifting. *Journal of South American Earth Sciences* 14: 257-270.
- Franzese, J.R., Dias, G. y Dalla Salda, L.H. 1992. Las estructuras de las metamorfitas Cushamen, Provincia de Chubut. 6° Reunión sobre Microtectónica, Actas 8: 27-30, Buenos Aires.
- Galli, C.A. 1969. Descripción Geológica de la Hoja 38c, Piedra del Águila, provincias del Neuquén y Río Negro. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 111, 67 p., Buenos Aires.
- Giacosa, R., Márquez, M., Nilni, A., Fernández, M., Fracchia, D., Parisi, C. y Scituito, J. 2004. Litología y estructura del basamento ígneo-metamórfico del borde SO del Macizo Nordpatagónico al oeste del río Chico (Cushamen, Chubut, 42° 10' S-70° 30' O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59: 569-577.
- Ghosh, S.K. y Sengupta, S. 1984. Successive development of plane noncylindrical folds in progressive deformation. *Journal of Structural Geology* 6: 703-709.
- Hervé, F., Haller, M.J., Duhart, P. y Fanning, C.M. 2005. SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons from Cushamen and Esquel Formations, North Patagonian Massif, Argentina: geological implications. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 309, Buenos Aires.
- Linares, E., Cagnoni, M.C., Do Campo, M. y Ostera, H.A. 1988. Geochronology of metamorphic and eruptive rocks of southeastern Neuquén and northwestern Río Negro Provinces, Argentine Republic. *Journal of South American Earth Sciences* 1: 53-61.
- López de Luchi, M.G. y Cerredo, M.E. 2008. Geochemistry of the Mamil Choique granitoids at Río Chico, Río Negro, Argentina: Late Paleozoic crustal melting in the North Patagonian Massif. *Journal of South American Earth Sciences* 25: 526-546.
- Lucassen, F., Trumbull, R., Franz, G., Creixell, C., Vázquez, P., Romer, R.L. y Figueroa, O. 2004. Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: the Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36-41 S). *Journal of South American Earth Sciences* 17: 103-119.
- Mosquera, A., Ramos, V.A. y Kay, S.M. 2006. Intraplate deformation in the Neuquén Embayment. En: Kay, S.M. y Ramos, V.A. (eds.), *Evolution of an Andean Margin: A Tectonic and Magmatic View from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S lat)*. Geological Society of America, Special Publication 407: 97, Boulder.
- Oriolo, S., Oyhançabal, P., Wemmer, K., Heidelbach, F., Pfänder, J., Basei, M.A. y Siegesmund, S. 2016. Shear zone evolution and timing of deformation in the Neoproterozoic transpressional Dom Feliciano Belt, Uruguay. *Journal of Structural Geology* 92: 59-78.
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Fanning, C.M. y Márquez, M. 2006. Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia. *Earth-Science Reviews* 76: 235-257.
- Passchier, C.W. y Trouw, R.A.J. 2005. *Microtectonics*, second edition. Springer-Verlag, 366 p., Berlin.
- Pryer, L.L. 1993. Microstructures in feldspars from a major crustal thrust zone: the Grenville Front, Ontario, Canada. *Journal of Structural Geology* 15: 21-36.
- Ramos, V.A. 1978. El vulcanismo del Cretácico inferior de la Cordillera Patagónica. 7° Congreso Geológico Argentino, Actas 7: 423-435, Neuquén.
- Ramos, V.A., Folguera, A. y García Morabito, E. 2011a. Las provincias geológicas del Neuquén. *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18° Congreso Geológico Argentino, Relatorio 1, 317-326, Neuquén.
- Ramos, V.A., Mosquera, A., Folguera, A. y García Morabito, E. 2011b. Evolución tectónica de los Andes y del Engolfamiento Neuquino adyacente. *Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén*. 18° Congreso Geológico Argentino, Relatorio 1, 335-348, Neuquén.
- Ramsay, J.G. 1967. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill Education, 568 p., New York.
- Ravazzoli, I.A. y Sesana, F.L. 1977. Descripción geológica de la Hoja 41c, Río Chico, Provincia de Río Negro. Servicio Geológico Nacional, Boletín 148, 77p., Buenos Aires.

- Sesana, F.L. 1968. Rasgos petrológicos de la comarca de Río Chico, Río Negro. Terceras Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 3: 99-105, Chubut.
- Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R. y Schmid, S.M. 2002. The eastern Tonale fault zone: a 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C. *Journal of Structural Geology* 24: 1861-1884.
- Sturm, P. y Triggs, B. 1996. A factorization based algorithm for multi-image projective structure and motion. 4th European Conference on Computer Vision, Proceedings Volume 2: 709-720, Cambridge.
- Varela, R., Dalla Salda, L., Cingolani, C. y Gomez, V. 1991. Estructura, petrología y geocronología del basamento de la región del Limay, provincias de Río Negro y Neuquén, Argentina. *Revista Geológica de Chile* 18: 147-163.
- Varela, R., Basei, M.A., Cingolani, C.A., Siga Jr, O. y Passarelli, C.R. 2005. El basamento cristalino de los Andes norpatagónicos en Argentina: geocronología e interpretación tectónica. *Revista Geológica de Chile* 32: 167-187.
- Volkheimer, W. 1964. Estratigrafía de la zona extraandina del departamento de Cushamen (Chubut) entre los paralelos 42 y 42 30' y los meridianos 70 y 71. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 19: 85-107.
- Vollgger, S.A. y Cruden, A.R. 2016. Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia. *Journal of Structural Geology* 85: 168-187.
- Von Gosen, W. 2009. Stages of Late Palaeozoic deformation and intrusive activity in the western part of the North Patagonian Massif (southern Argentina) and their geotectonic implications. *Geological Magazine* 146: 48-71.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. y Reynolds, J.M. 2012. "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300-314.
- Whitney, D.L. y Evans, B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.

Recibido: 22 de febrero, 2018

Aceptado: 20 de julio, 2018