



VARIACIÓN DE LA FÁBRICA MAGNÉTICA A LO LARGO DEL MARGEN SUDOCCIDENTAL DEL GONDWANA DESDE EL DEVÓNICO SUPERIOR HASTA EL PERMO-TRIÁSICO

R. N. Tomezzoli^{1*}, H. Tickyj², G. Arzadún³, M. J. Ochoa², L. C. Gallo¹, M. E. Woroszylo¹, J. M. Battler², V.A. Barraza²

¹Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Instituto de Geofísica “Daniel A. Valencio”. Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires IGEBA – CONICET, Argentina.

²Universidad Nacional de La Pampa, FCEyN., Departamento de Geología, Argentina.

³Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, CONICET. Bahía Blanca, Argentina.

* e-mail: rtomezzoli@gmail.com

ABSTRACT

Here are presented some results of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) obtained along the Southwest Gondwana margin from the Sierras Australes to the Agua Escondida localities. Rocks of different lithologies and ages ranging from Late Devonian to Permian-Triassic were studied. Each locality has its own magnetic signature. In most of them there is a gradual development in the tectonic expression of AMS within and between localities. For rocks of Permian age there is a clear regional magnetic signature indicating an NW-SE elongation direction and NE-SW shortening. However, AMS patterns obtained in the oldest rocks are complex, probably as the result of stress interference in the magnitudes, space and time with different pulses of the orogenic activity developed from the Middle Devonian (Cháñica orogenic phase) to the Permian (San Rafael orogenic phase). Local responses related with lithological control in each locality are not ruled out.

Keywords: Gondwanides belt, Deformation, Anisotropy of magnetic susceptibility, Paleozoic

RESUMEN

Aquí se presentan algunos de los resultados de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) obtenidos a lo largo del margen Sudoccidental del Gondwana desde las Sierras Australes de Buenos Aires hasta la localidad de Agua Escondida. Se estudiaron rocas con distintas litologías y edades que abarcan desde el Devónico Superior al Permo-Triásico. Cada localidad de muestreo presenta una signatura magnética propia. En casi todas ellas hay un desarrollo gradual en la expresión tectónica de la ASM dentro y entre las localidades estudiadas. Para las rocas de edades pérmicas hay una impronta magnética regional clara que indica direcciones de elongación NO-SE y de acortamiento SO-NE. Sin embargo, cuando se analizan los patrones obtenidos en las rocas más antiguas la signatura deja de ser constante y los patrones de ASM son complejos, poniendo en evidencia interferencias de esfuerzos principales cambiantes en las magnitudes, en el espacio y en el tiempo producto de la superposición de diferentes pulsos en la actividad orogénica que se desarrolló desde el Devónico medio (Fase orogénica Cháñica) hasta el Pérmico (Fase orogénica San Rafael). Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que sean respuestas locales con un control litológico propio en cada localidad.

Palabras clave: Cordón de los Gondwánides, Deformación, Anisotropía de susceptibilidad magnética, Paleozoico



Introducción

El borde sudoccidental de Gondwana forma parte del cinturón plegado del Cabo de Sudáfrica (Keidel, 1916; Du Toit, 1927) que en Sudamérica se extiende desde la provincia de Buenos Aires, hasta el Bloque de San Rafael en la provincia de Mendoza y que podría representar la posible zona de sutura entre Gondwana y Patagonia (Fig. 1). Esta faja plegada y corrida (Tomezzoli y Cristallini, 1998) conocida como Cordón

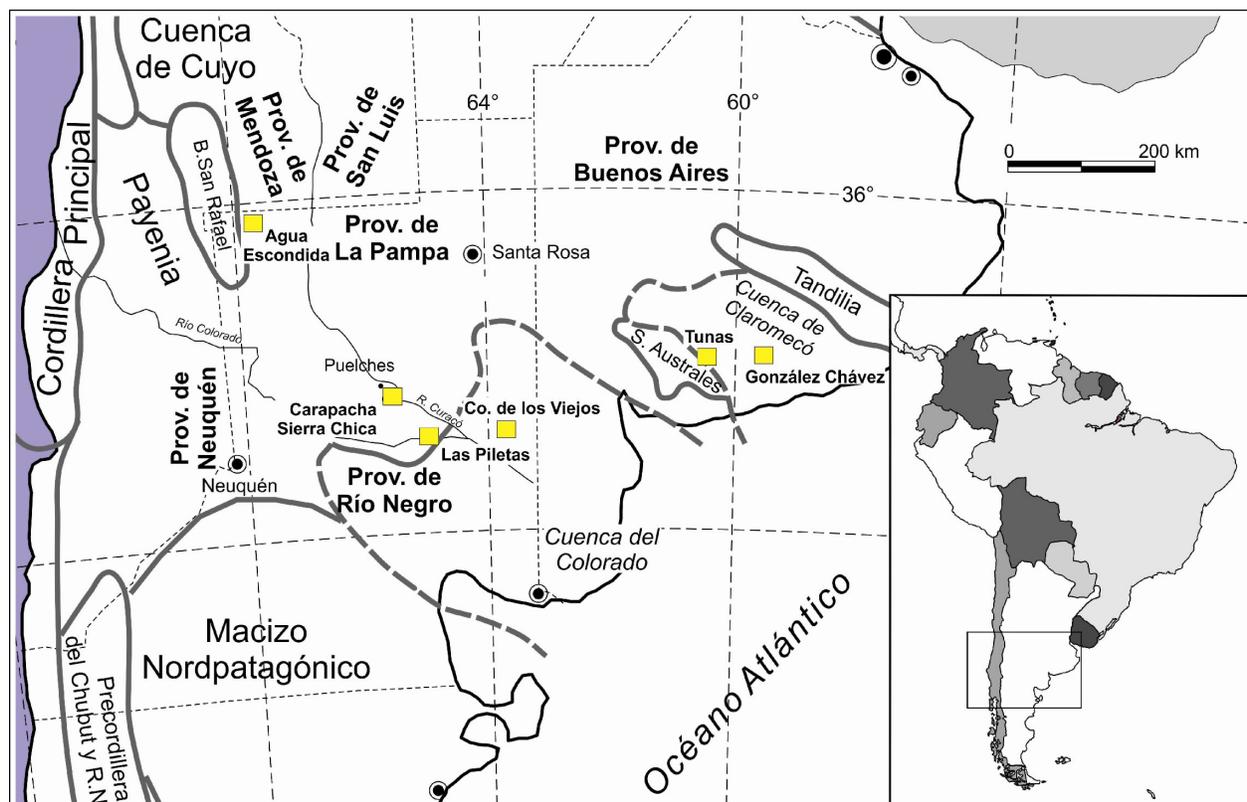


Figura 1. Ubicación de las localidades de muestreo donde se realizaron los estudios de fábricas magnéticas a lo largo del margen sudoccidental del Gondwana

de las Gondwánides (Keidel, 1916), estuvo sometida a deformación hasta el Paleozoico. A partir de la propuesta planteada por Ramos (2008) de considerar Patagonia como un continente alóctono a la deriva que colisionó durante el Paleozoico tardío contra el borde sudoccidental del Gondwana, surgieron modelos nuevos que se pueden agrupar en modelos de tipo colisionales y modelos de deformación intracontinental (véase referencias en Tomezzoli y Cristallini 2004). Sin embargo, aún quedan dudas y controversias acerca del posible origen de la Patagonia y sobre todo del momento en que se habría producido la deformación principal a lo largo del cordón y si estaría relacionada o no con esta colisión. Para algunos investigadores la deformación ocurrió en una sola fase durante el Pérmico tardío-Triásico, para otros en cambio comenzó en el Devónico Tardío-Carbonífero temprano y se extendió hasta el Pérmico (véase referencias en Tomezzoli, 2012).

Con el objetivo de analizar regionalmente la magnitud de la deformación, las direcciones de los esfuerzos actuantes en distintos momentos geológicos y las relaciones temporo-espaciales entre las distintas localidades a lo largo del cordón de las Gondwánides se están realizando estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética a lo largo de todo el margen. Aquí se presentan algunos de los resultados obtenidos. Las localidades estudiadas abarcan distintas litologías y edades desde rocas pre-carboníferas a permo-triásicas.



Metodología

La ASM es una técnica efectiva utilizada para medir la petrofábrica de las rocas, ya sea de origen primario o tectónico (Graham, 1954; Borradaile, 1988). El método está basado en la medición de la intensidad de la magnetización y en la orientación de los minerales magnéticos presentes en las rocas (Gleizes *et al.*, 1993). La ASM fue medida con un equipo Kappabridge MFK-1A, en los Laboratorios de Geología Estructural de Colgate University (NY-USA), y de Paleomagnetismo “Daniel A. Valencio” (IGEBA) del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Buenos Aires. Se utilizan siempre los especímenes sobre los cuales luego se aplican las técnicas de desmagnetización estándar para estudios paleomagnéticos.

Resultados

En todas las localidades analizadas, los datos de ASM muestran buena consistencia interna dentro y entre cada sitio de muestreo y en casi todas ellas fue posible correlacionar los rasgos estructurales presentes con los patrones de ASM encontrados (Fig. 2). En el área de Sierra de la Ventana (Fig. 1 y 2) se analizó el Grupo Pillahuincó de edad carbonífera superior-pérmica en dos estudios complementarios. El primero abarcó a la Formación Tunas y González Chavez (Arzadún *et al.*, 2013; Fig. 2) y el segundo a las Formaciones Sauce Grande, Piedra Azul y Bonete (Arzadún *et al.*, 2015, este congreso). Esta localidad presenta un registro de ASM tectónicamente controlado. En la Formación Tunas, hay diferencias entre la fábrica magnética de la base y el techo, que son consistentes con las diferencias estratigráficas, estructurales, paleomagnéticas y de compactación, presentes en la cuenca de depositación (Arzadún, 2015). En las localidades ubicadas hacia el este de la cuenca donde los estratos son más jóvenes, y las magnetizaciones son sintectónicas (90% de despliegue) las fábricas son predominantemente sedimentarias. Mientras que en las localidades ubicadas hacia el oeste, con registro de la base de la columna estratigráfica y por lo tanto más antiguas, con mayor deformación (magnetizaciones sintectónicas al 32% de despliegue) evidencian la influencia de los esfuerzos tectónicos actuantes al momento de la depositación de los sedimentos. En González Chaves que remata temporalmente la secuencia, la fábrica es claramente sedimentaria. Entre las Formaciones Sauce Grande a Bonete también hay una transición entre una fábrica de origen tectónico hacia la base que cambia a fábricas de tipo sedimentarias hacia el techo (ver Arzadún *et al.*, 2015, este congreso). Todas estas evidencias geológicas estarían indicando que la deformación en la región actuó desde el SO y se fue atenuando durante el Pérmico Temprano al Pérmico Tardío, evidenciando también la migración del frente orogénico a la cuenca de antepaís ubicada hacia el NE, con pulsos de reactivación de la deformación que estarían indicando un ciclo de mayor actividad orogénica del Gondwana durante el Pérmico.

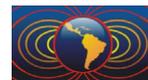
El cerro de los Viejos (Fig. 1 y 2) forma parte de una zona de deformación dúctil en condiciones metamórficas de grado medio con vergencia hacia el NE (Tickyj *et al.* 1997). En el mismo se reconocen diferentes grados de deformación que van desde un gneis granítico poco foliado a un gneis milonítico. Las edades preliminares disponibles hasta el momento son 466.4 ±1.2 Ma; 304 ±15 Ma; 309 ±15 Ma; 359.5 ±3 Ma; 280.4 ±2.3 Ma; 265 ±13 Ma; 261 ±13 Ma (Tickyj, 1999). En esta localidad se realizó un muestreo sistemático para ASM sobre el diseño de una grilla transversal a las estructuras principales del cuerpo (Tomezzoli *et al.*, 2003). Se encontró un buen ajuste entre los ejes $K_{máx}$ y la lineación mineral, pero con menos inclinación que la lineación e incluso inclina también hacia el NE. El eje K_{min} en cambio, que se esperaba debería estar cerca del polo de los planos de foliación en el cuadrante NE, yace principalmente en otro cuadrante. Esta situación es inusual ya que la lineación mineral controla el eje $K_{máx}$ de anisotropía y una foliación secundaria más débil que no es visible en el campo controla el eje K_{min} de anisotropía. La distribución de minerales paramagnéticos y ferromagnéticos en planos de estructuras tipo “S-C” interfieren en el patrón esperado de anisotropía, indicando la presencia de una foliación críptica. Tanto desde el punto de vista petrográfico (Tickyj *et al.*, 1997) como de los estudios de ASM se puede inferir que toda la zona estuvo sometida a más de un



estudios paleomagnéticos y de anisotropía de susceptibilidad magnética (Tomezzoli *et al.*, 2006; Fig. 2). Las posiciones paleopolares de ambos miembros son distintas (Tomezzoli *et al.*, 2006). De los estudios de ASM surge que la componente tectónica dentro de la fábrica de anisotropía es distinta para ambos miembros. El Miembro Calencó en la estancia San Roberto (Fig. 2) presenta menos deformación que el Miembro Curacó (Fig. 2). En la estancia San Roberto K_{max} es más variable y no refleja el rumbo de los ejes del plegamiento excepto localmente y por lo tanto es posible que se preserven más las fábricas sedimentarias primarias que en el caso de la localidad del río Curacó. Por el contrario, en todos los especímenes del río Curacó los polos de los ejes K_{max} parecen estar tectónicamente controlados dado que reflejan la dirección de los ejes del plegamiento (Fig. 2) y el K_{min} está distribuido bimodalmente con un elipsoide típicamente prolado (Fig. 2) con un esfuerzo principal máximo de dirección dominante SO-NE. Las diferentes posiciones paleomagnéticas calculadas para ambos miembros son consistentes con sus diferencias litológicas, estructurales, bioestratigráficas y de patrones de fábricas magnéticas.

La Sierra Chica se encuentra ubicada en la provincia de La Pampa, Argentina. Se trata de un afloramiento de rocas volcánicas perteneciente a la provincia magmática Choiyoi. Esta secuencia se compone de distintas unidades, cada una de las cuales presenta características litológicas, estructurales, de petrofábrica y radiométricas propias, además de la falta de continuidad física entre las mismas. La magnetización aislada es sintectónica (Tomezzoli *et al.*, 2009). Hay dos poblaciones de magnetizaciones y firmas magnéticas distintas: una para las unidades de la base de la secuencia y otra para la unidad del techo que pueden apreciar claramente con los datos de ASM (Fig. 2). Estas diferencias fueron interpretadas como una discordancia tectónica orogénica entre ambas. El K_{min} tiende a ubicarse en una guirnalda de rumbo SO-NE desde posiciones horizontales hasta la vertical (base-techo). Esto evidencia que la dirección del esfuerzo máximo es SO-NE.

La localidad de Agua Escondida, está ubicada al SE de la provincia de Mendoza e incorporada en el sector sur del Bloque de San Rafael (Figs. 1 y 2). Se analizaron diferentes unidades litoestratigráficas (Tickyj *et al.*, 2015), entre ellas los granitos pre-carboníferos de la Formación Piedra de Afilar, rocas sedimentarias de edad carbonífera superior (Formación Agua Escondida), granitos porfíricos (Granito Cavado) y diques riolíticos e ignimbritas pertenecientes al Grupo Choiyoi, hasta basaltos cuaternarios (Formación Chapúa). Del análisis de las direcciones principales de ASM (Battler, 2015) surge que para las rocas sedimentarias de la Formación Agua Escondida, los ejes K_{max} están orientados hacia el NE contenidos en el plano de estratificación de las capas de rumbo NO-SE, indicando que la fábrica de las mismas son primarias debiéndose a esfuerzos principales σ_1 con una orientación SW-NE que actuaron transportando sus componentes minerales. En el caso de los basaltos cuaternarios el eje principal K_{max} tiene una orientación NW y cercano a la horizontal, indicando que la fábrica es de tipo primaria y podría evidenciar fluidez de los componentes minerales en una dirección SW-NW. Para el Granito Cavado y diques del mismo, los ejes principales de ASM parecen no seguir un patrón de ubicación común en el espacio, de manera tal que las fábricas magnéticas de estos cuerpos parecen ser primarias y responden a efectos más locales que regionales propios de las condiciones de emplazamiento. En el caso del Granito Piedras de Afilar el eje principal K_{min} poseen una dirección N-NO mientras que el K_{max} está en dirección E-O, indicando que la fábrica del mismo es de tipo secundaria evidenciando deformación con una dirección de compresión N-S. Sin embargo en el Granito La Menta (que es parte del propio Granito Piedras de Afilar), el eje principal K_{min} tiene una dirección WSW y el K_{max} N-S, determinando una fábrica secundaria y evidenciando una deformación con una dirección de compresión desde el O. En el caso de los diques y la ignimbrita del Choiyoi, las fábricas resultan ser similares a las del granito Piedras de Afilar y Granito La Menta, siendo las mismas secundarias producto de esfuerzos por deformación con direcciones de compresión E-O y



N-S, respondiendo a patrones complejos de esfuerzos previamente instalados en la región.

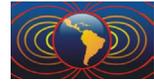
El Cerro Las Piletas (Figs. 1 y 2), ubicado al sur de la Provincia de La Pampa, es una ignimbrita riolítica de alto grado que presenta una estructura de rumbo regional aproximado de Azimut: 340°/Inclinación: 25°-30°, dada por una foliación magmática determinada por la orientación de los fiammes en la ignimbrita. La edad obtenida es de 252.5 ± 0.44 Ma, que corresponde al Pérmico superior casi en el límite con el Triásico y se interpreta como la edad de cristalización de la ignimbrita. En esta localidad no hay un patrón definido y hay diferencias en la fábrica entre los distintos sitios muestreados posiblemente debido a las características intrínsecas de cada uno de los flujos piroclásticos como podrían ser: variaciones en la dirección del flujo, velocidad, viscosidad, compactación diferencial dependiendo de la ubicación estratigráfica dentro del perfil, desvitrificación o bien inversión de los ejes del elipsoide de ASM. Del análisis direccional de la fábrica magnética (Barraza, 2013) se observa que los ejes $K_{máx}$ de ASM tienden a estar contenidos en el plano de estratificación de las capas y cercanos a la horizontal. Los ejes K_{min} tienden a ser paralelos al polo del plano de estratificación pero presentan cierta imbricación, tendiendo a ubicarse hacia el O-NO con una inclinación de hasta 60°. Cuando se lleva a la horizontal el plano de inclinación de la capa, la imbricación de los ejes K_{min} es más clara. De las relaciones espaciales de los ejes entre sí y con respecto al plano de foliación magmática surge que en esta localidad hay imbricaciones positivas y negativas y que la inclinación de la estratificación no sería primaria sino que estaría vinculada a un basculamiento posterior al emplazamiento con una dirección del esfuerzo principal máximo de orientación SO-NE, consistente con la dirección de acortamiento regional.

Conclusiones

Aquí se presentan algunos de los resultados de ASM obtenidos a lo largo del margen Sudoccidental del Gondwana desde las Sierras Australes de Buenos Aires hasta la localidad de Agua Escondida, que fueron complementados con otros estudios. Se estudiaron rocas con distintas litologías y edades que abarcan desde el Devónico Superior al Permo-Triásico. Cada localidad de muestreo presenta una signatura magnética propia que responde a características litológicas y de edades intrínsecas. Sin embargo, en casi todas ellas hay un desarrollo gradual en la expresión tectónica sobreimpreso que diferencia los diferentes patrones de ASM dentro y entre las localidades estudiadas. Para las rocas de edades pérmicas como es el caso del Grupo Pillahuincó, Cuenca de Carapacha, Sierra Chica y Las Piletas hay una impronta magnética regional clara que indica direcciones de elongación NO-SE y de acortamiento SO-NE. Esta deformación pérmica se vincula con la fase orogénica San Rafael. La movilidad de los ejes K_{min} desde la horizontal en los sitios más occidentales correspondientes a la base de las respectivas secuencias, hasta la vertical en los sitios más orientales ubicados hacia los respectivos techos, indicaría una transición desde una fábrica magnética con una impronta tectónica clara hacia fábricas de tipo transicionales a sedimentarias. Esto evidencia pulsos en la intensidad de la deformación con una disminución hacia el este o sea un avance del frente orogénico hacia el antepaís, con esfuerzos provenientes desde el SO. Cuando se observa la curva de deriva polar aparente del Gondwana para el Paleozoico superior (Tomezzoli, 2009; Gallo *et al.*, 2015, este congreso) esta deformación queda en evidencia por la presencia de un codo abrupto en su recorrido.

Sin embargo, cuando se analizan los patrones obtenidos en las rocas más antiguas (Cerro de los Viejos y Agua Escondida) la signatura deja de ser contante y se obtienen direcciones de esfuerzos principales que pueden ser tanto desde el SO como desde el O, desde el Sur o bien patrones de interferencias complejos que podrían estar respondiendo a la superposición de diferentes fases orogénicas aunque no se descarta la posibilidad de que sean respuestas locales con un control litológico propio en cada localidad.

Para Tomezzoli (2012) la deformación ocurrida durante el límite Pérmico temprano - Pérmico tardío con una dirección de esfuerzo principal desde el SO, es el producto de una reorganización



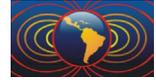
paleogeográfica de todo el Gondwana que se trasladaba hacia latitudes más bajas a la vez que se estaba fusionando con Laurasia por el Norte para formar la Pangea durante el Triásico. En el Gondwana sudoccidental pequeñas placas continentales se acrecieron al núcleo principal del Gondwana durante el Devónico medio. Esta deformación devónica en Argentina se conoce como fase orogénica Cháñica y fue relacionada por Tomezzoli (2012) con la colisión de Chilenia y Patagonia con Gondwana desde el Oeste, Sur y/o Suroeste. Los patrones complejos de ASM en las rocas más antiguas podrían estar evidenciando esta superposición e interferencias de esfuerzos con direcciones principales de esfuerzos cambiantes en el espacio y el tiempo.

Agradecimientos

Este trabajo fue a lo largo de todos estos años por Proyectos de Investigación UBACyT, ANPCyT -PICT, CONICET y Proyecto Fundación Antorchas y de Vinculación Tecnológica “Ing. E. Mosconi”..

Referencias

- Arzadún, G., 2015. Análisis del soterramiento de la Formación Tunas en las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires a partir de índices de compactación y de empaquetamiento. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Sur, 243 p.
- Arzadún, G., Tomezzoli, R. N., Cesaretti, N., 2016. Evidencias de avances y retrocesos en la deformación a partir del estudio de la anisotropía de susceptibilidad magnética. Grupo Pillahuincó (Sierras Australes, Argentina). *Latinmag Letters*, v. 6, *Special Issue, Proceedings of Fourth Biennial Sao Pablo, Brasil*. <http://www.geofisica.unam.mx/LatinmagLetters>.
- Arzadún, G., Tomezzoli, R. N., Cesaretti, N., 2013. Análisis de la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) y compactación en la Formación Tunas, Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Latinmag Letters*, v. 3, *Special Issue, PB18, 1-6, Proceedings of Third Biennial Meeting of Montevideo, Uruguay*. <http://www.geofisica.unam.mx/LatinmagLetters/LL13-03-SP/B/PB18.pdf>
- Barraza, V., 2013. Paleomagnetismo del Cerro Las Piletas, provincia de La Pampa, Argentina. Estudio de la fábrica magnética. Tesina de Licenciatura. Universidad Nacional de La Pampa, 58 pgs.
- Battler, Juan Manuel, 2015. Fábrica magnética en el área de Agua Escondida, Bloque de San Rafael, Mendoza. Tesina de Licenciatura. Universidad Nacional de La Pampa, 95 pgs.
- Du Toit, A. L., 1927. A Geological Comparison of South America with South Africa. Carnegie Institute Publication n. 381, 157 p.
- Gallo, L. C., Tomezzoli, R. N., Farjat, A. D., Hernández, R. M., , 2015. Revisión de la Curva De Deriva Polar aparente de Gondwana durante el Paleozoico superior, Implicancias sobre la configuración de Pangea. *Latinmag Letters*, v. 6, *Special Issue, Proceedings of Fourth Biennial Sao Pablo, Brasil*.
- Keidel, J., 1916. La geología de las Sierras de la provincia de Buenos Aires y sus relaciones con las montañas del Cabo y los Andes. Minería, Agricultura, Nacional. Anales Dirección Nacional. *Geología Minera, IX*, 3. Buenos Aires.
- Melchor, R. N., 1999. Redefinición estratigráfica de la Formación Carapacha (Pérmico), Provincia de La Pampa, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 54 (2), 99-108.
- Ramos, V. A., 1984. Patagonia: un nuevo continente paleozoico a la deriva? 9º Congreso Geológico Argentino (S. C. Bariloche). Actas 2: 311-325. Buenos Aires.
- Tickyj, H., 1999. Estructura y petrología del basamento cristalino de la región centro - sur de la provincia de La Pampa, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata, 228. La Plata.
- Tickyj, H., Tomezzoli, R. N., Basei, M. A., Fernández, M. A., Blatter, J. M., Rodriguez, N., Gallo, L. C., 2015. Geología de la Formación Piedras de Afilas, basamento granítico del Distrito Minero Agua Escondida, Mendoza. 3º Simposio sobre Petrología Ignea y Metalogénesis asociada (General Roca, Argentina). En prensa.



- Tickyj, H., Dimieri, L. V., Llambías, E. J., Sato A. M., 1997. Cerro de los Viejos (38° 28' S - 64° 26' O): cizallamiento dúctil en el sudeste de La Pampa. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 52 (3), 311-321.
- Tomezzoli, R. N., 2012. Chilenia y Patagonia: el mismo continente alóctono a la deriva?. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69 (2), 220 – 237.
- Tomezzoli, R. N., 2009. The Apparent Polar Wander Path for South America During the Permian-Triassic. *Gondwana Research*, 15, 209 – 215.
- Tomezzoli, R. N., Melchor, R. y MacDonald, W. D. 2006. Tectonic implications of post-folding Permian magnetizations, Carapacha basin, Argentina. Paleomagnetism in Latinoamerica, Special Volume. *Earth and Planets Space*, 58, 1235-1246.
- Tomezzoli, R. N., MacDonald, W. D., Tickyj, H., 2003. Composite magnetic fabrics from S-C granitic gneiss of Cerro de los Viejos, La Pampa province, Argentina. *Journal of Structural Geology*, 25/2, 159-169.