



## ANÁLISIS DE ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (ASM) Y COMPACTACIÓN EN LA FORMACIÓN TUNAS, SIERRAS AUSTRALES DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

Guadalupe Arzadún<sup>1,2</sup>, Renata N. Tomezzoli<sup>3</sup>, Nora N. Cesaretti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional del Sur, Dpto. de Geología,

<sup>2</sup>CIC, Bahía Blanca, Argentina

<sup>3</sup>Universidad de Buenos Aires. FCEyN. Dpto. de Geología, CONICET, Buenos Aires, Argentina

### RESUMEN

La Formación Tunas (Pérmico) aflora al este de las Sierras Australes, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Está constituida por areniscas finas a medias y fangolitas, portadoras de hematita como mineral detrítico. Se presentan resultados de un estudio de ASM y compactación. El objetivo es poder determinar la dirección y la magnitud de los esfuerzos tectónicos principales y correlacionarlos con los resultados de compactación. En los elipsoides de ASM se observa que la dirección de los ejes  $K1$  están cercanos a la horizontal con dirección NW-SE, mientras que los ejes  $K3$  están en una guirnalda de rumbo SW-NE desde posiciones horizontales hasta la vertical. Esto evidencia que la dirección del esfuerzo máximo es SW-NE. La movilidad de los ejes  $K3$  desde la horizontal en los sitios más occidentales correspondientes a la base, hasta la vertical en los sitios más orientales ubicados hacia el techo, indica una progresión de la fábrica magnética desde una impronta tectónica hacia una fábrica de tipo sedimentaria. Esto evidencia una disminución de la intensidad de la deformación hacia el Este, con esfuerzos provenientes desde el SW, lo cual se condice con el grado de compactación que también muestra una disminución hacia el Este.

**Palabras clave:** Anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) – Índice de compactación (CI) – Índice de empaquetamiento cerrado (TPI) - Formación Tunas – Sierras Australes - Paleozoico.

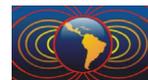
### ABSTRACT

Tunas Formation (Permian) crops out at the east area of Sierras Australes (Buenos Aires province, Argentina) and subsurface continues in the Claromecó Basin. It is integrated by fine to medium sandstones alternating with mudrocks bearing detritic hematite. An AMS study is carried out to evaluate the internal deformation, at different stratigraphic levels of Tunas Formation, with the aim of determining direction and magnitude of the main efforts which had acted on this Formation and to relate them with compaction studies. Results show that the  $K1$  poles trend NW-SE, close to the regional axial fold trend and  $K3$  have good consistence with the bedding plane pole, placed in a girdle perpendicular to  $K1$ . The  $K3$  positions changes from the horizontal at the bottom of the sequence to the vertical at the top of the sequence showing in this level a clear sedimentary fabric. These changes in the  $K3$  axis positions have proved a decrease of the deformation intensity toward the foreland basin. The NW trend of the  $K1$  axes implies a SW-NE compression in concordance with the regional compression pattern along the Gondwanaland margin. The results fit in the compaction degree that shows a decrease from West to the East.

**Keywords:** Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) – Internal deformation – Tunas Formation – Sierras Australes – Paleozoic - Compaction Index (CI) – Tight packing Index (TPI)

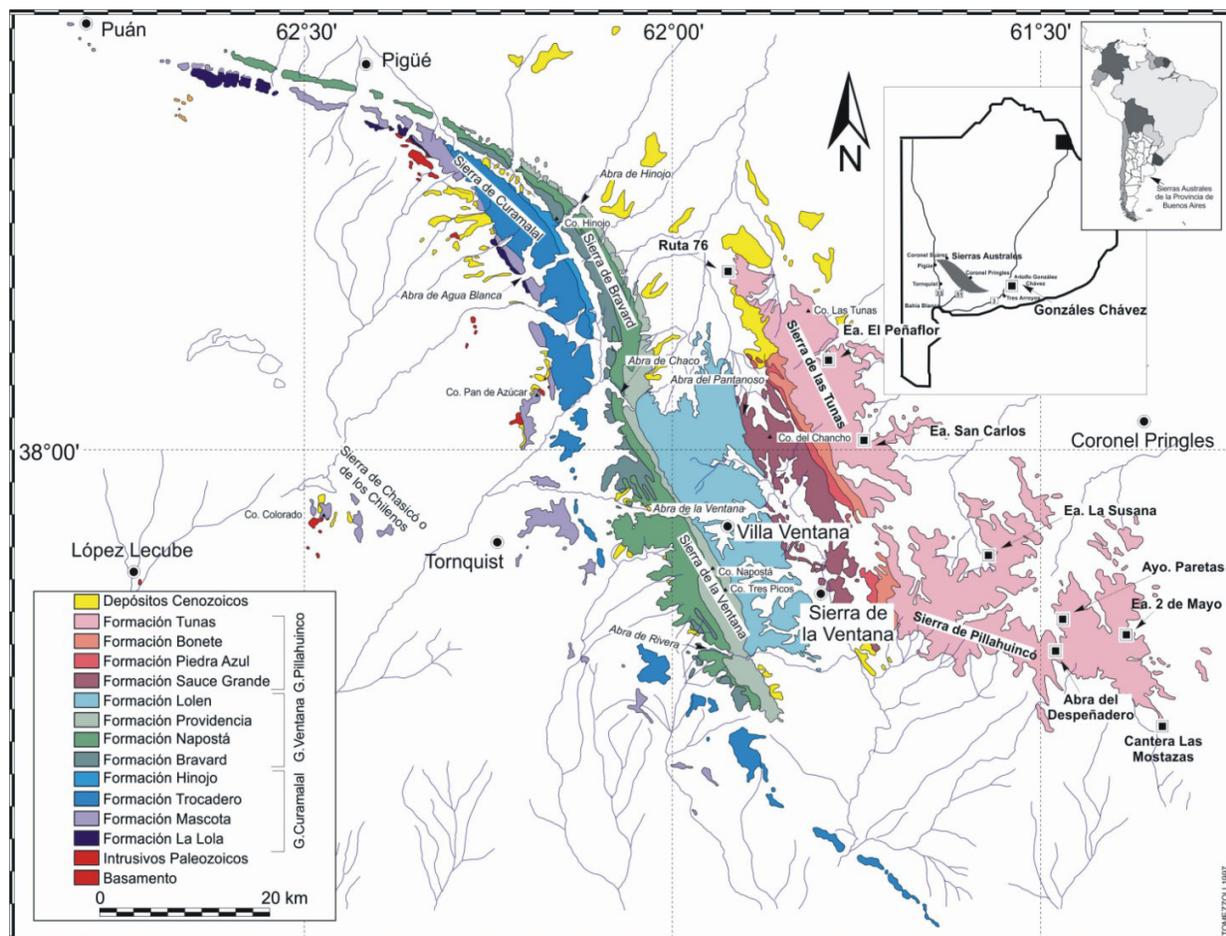
### Introducción

Las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires se encuentran ubicadas entre los 37° y 39° de Latitud Sur y 61° y 63° de Longitud Oeste (fig. 1). Presentan un rumbo general noroeste-sudeste. En las mismas afloran rocas cuyas edades van desde el Precámbrico Tardío hasta el Pérmico, disponiéndose las más antiguas hacia el oeste y las más jóvenes hacia el este, siguiendo la geometría regional del orógeno. Estas unidades



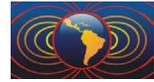
están cubiertas en discordancia por depósitos cenozoicos.

La vergencia general de la cadena es nororiental, disminuyendo la intensidad de la deformación hacia el este. Tomezzoli y Cristallini (1998, 2004) consideran a las Sierras Australes como una faja corrida y plegada.



**Figura 1.** Mapa de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires, con las localidades de muestreo, adaptado de Harrington (1947).

La Formación Tunas (Harrington, 1947), de edad Pérmica (Archangelsky y Cúneo, 1984), se extiende en el sector oriental de las Sierras Australes desde el norte de la Sierra de Las Tunas hasta el sur de la Sierra de Pillahuincó y continúa en subsuelo hacia el este en la Cuenca de Claromecó (Lesta y Sylwan, 2005), con algunos afloramientos aislados en la zona de Gonzáles Chávez (fig. 1). Está constituida por areniscas medias a gruesas de colores amarillos y grises, areniscas finas a muy finas de colores verdosos y fangolitas de colores rojizos. Es importante destacar la presencia de cantidades importantes de hematita en la composición de estas rocas, que se encuentra en forma de granos detríticos en las areniscas, en forma de nódulos en areniscas finas y como uno de los componentes principales del cemento en las fangolitas rojizas (Andreis *et al.*, 1979). Esta hematita es la portadora de la magnetización remanente estable y característica de la Formación Tunas. El rumbo regional de los ejes de los pliegues tiene una dirección NW-SE y se observan diaclasas paralelas y perpendiculares a los planos de estratificación, rellenas de cuarzo, algunas de rumbo NW-SE y otras de rumbo SW-NE. Hacia la base de la secuencia los pliegues tienden a ser cilíndricos con longitudes de onda más cortas y flancos más definidos, mientras que hacia el techo de la secuencia tienden a ampliar sus



longitudes de onda y a suavizarse.

Arzadún *et al.* (2011) presentaron resultados preliminares de ASM, comparándolos con estudios previos paleomagnéticos (Tomezzoli, 1999; Tomezzoli y Vilas, 1999; Tomezzoli, 2001), obteniendo resultados consistentes y concluyendo que existe una disminución en la intensidad de la deformación hacia el este, con esfuerzos provenientes desde el SW.

Arzadún y Cesaretti (2009) realizaron una estimación preliminar de la profundidad de soterramiento en muestras de areniscas de la Formación Tunas, mediante índices de compactación y de empaquetamiento.

El objetivo del presente trabajo es relacionar las direcciones y la variación en la magnitud de los esfuerzos principales que actuaron en distintos sectores de la Formación Tunas con resultados de compactación. Con tal motivo se midió la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) y se calcularon los índices de compactación (CI) y de empaquetamiento cerrado (TPI) en muestras extraídas de ocho localidades de muestreo, provenientes de distintos niveles estratigráficos (fig. 1).

## Metodología

La anisotropía de susceptibilidad magnética (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 diamagnéticos, paramagnéticos, antiferromagnéticos y ferromagnéticos (Gleizes *et al.*, 1993) presentes en las rocas.

Las mediciones de ASM fueron realizadas en el Laboratorio de Paleomagnetismo “Daniel A. Valencio” (INGEODAV) del Departamento de Geología de la Universidad de Buenos Aires, con un equipo Kappabridge. Se utilizaron especímenes estándar para paleomagnetismo provenientes de distintas localidades de la Formación Tunas. En cada localidad de muestreo se sacaron por lo menos tres sitios con cuatro muestras de mano como mínimo. Se midieron en total 92 especímenes provenientes de ocho localidades, que ocupan posiciones estratigráficas y estructurales diferentes dentro de la cuenca: Estancia San Carlos, Estancia Peñaflor, Ruta 76 y Arroyo Toro Negro, aflorantes en el ámbito de las Sierra de las Tunas y Estancia Las Lomas-La Susana, Estancia 2 de Mayo, Arroyo Paretas (ruta provincial N°51) y Cantera Las Mostazas, en la Sierra de Pillahuincó (fig.1). Se determinaron los principales ejes de anisotropía ( $K1$ ,  $K2$  y  $K3$ ) y su magnitud ( $Pj$ ).

Se prepararon secciones delgadas pulidas de muestras de areniscas de grano medio, que fueron estudiadas petrográficamente mediante microscopía de transmisión en el Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur. Se reconocieron distintos tipos de contactos, utilizando los criterios de Taylor (1950): flotante, puntual, recto, cóncavo-convexo y suturado. Se efectuó el recuento de los distintos tipos de contactos presentes entre granos (entre 300 y 500 puntos por muestra), mediante contador puntual JMicrovision. De esta manera se calculó el índice de empaquetamiento cerrado (Tight Packing Index, TPI) y el índice de contactos (Contact Index, CI) en cada muestra.

El “índice de empaquetamiento cerrado” (TPI) fue definido por Wilson y McBride (1988) como la sumatoria de contactos rectos (r), cóncavo-convexos (c) y suturados (s) que muestra una arenisca, sobre el número total de contactos ( $Tc$ ).

$$TPI = (r + c + s) / Tc \quad (\text{Ecuación 1})$$

El índice de contactos (CI) fue introducido por Taylor (1950) como un parámetro de empaquetamiento en areniscas. Corresponde con la sumatoria del número de contactos entre granos (puntuales: p, rectos: r, cóncavo-convexos: c y suturados: s), sobre el número total de contactos ( $Tc$ ).

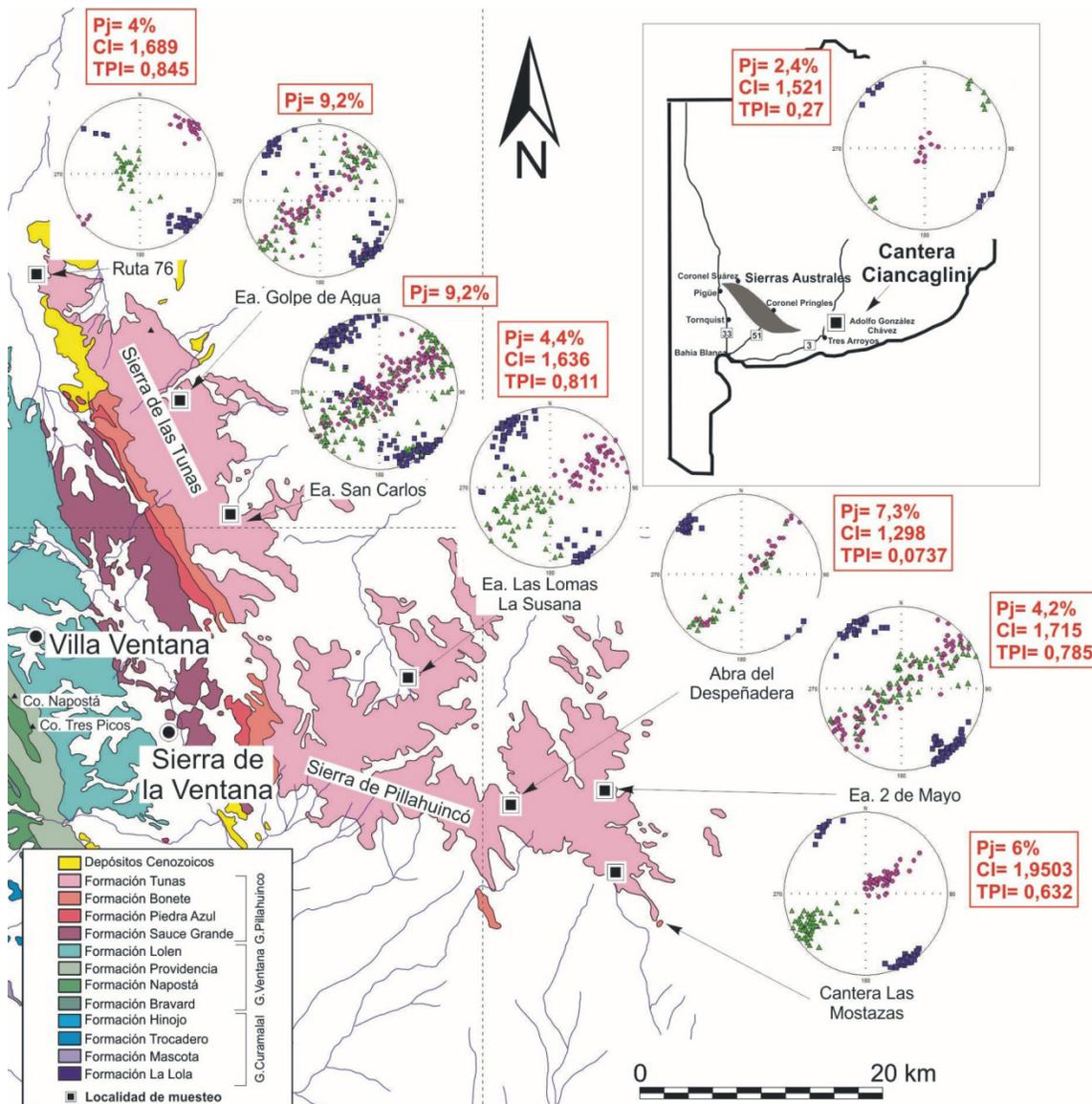
$$CI = (p + r + c + s) / Tc \quad (\text{Ecuación 2})$$

## AMS - Resultados y Análisis

En todas las localidades analizadas, los datos de ASM muestran buena consistencia interna dentro de cada sitio de muestreo. Esto permite correlacionar los rasgos estructurales presentes en cada localidad de muestreo con los patrones de ASM encontrados, que van cambiando en términos de la expresión tectónica



sobreimpresa. Los ejes  $K1$  del elipsoide de anisotropía, que marcan la dirección de máxima elongación, se orientan con rumbo NW-SE, paralelos al rumbo de los ejes de los pliegues y tienden a ser constantes en todas las localidades de muestreo (fig. 2). Este tipo de registro parece estar tectónicamente controlado. Los ejes  $K3$ , relacionados con ejes de acortamiento, muestran una distribución bimodal aunque se ubican paralelos a los polos de los planos de estratificación. En la base de la columna estratigráfica, en las localidades más occidentales y con mayor deformación, los ejes se encuentran cercanos a la horizontal, con rumbos aproximados SW-NE, indicando un esfuerzo máximo compresivo ( $\sigma_1$ ) en la misma dirección (Fig. 2). En contraste, hacia el techo y en las localidades más orientales, el  $K3$  tiende a ubicarse en la vertical, mostrando una fábrica claramente sedimentaria con planos de estratificación horizontales.



**Figura 2.** Resultados de anisotropía de susceptibilidad magnética, valores de magnitud de la anisotropía (Pj), valores de índices de contacto (CI) y valores de índices de empaquetamiento cerrado (TPI), de los especímenes de las ocho localidades medidas en la Formación Tunas.



Los valores de la magnitud de la anisotropía ( $P_j$ ) son menores al 9.2% y muestran una disminución hacia el este, hacia las localidades donde se registra del techo de la secuencia (fig. 2).

### Compactación - Resultados y Análisis

El TPI se calculó mediante la Ecuación (1), a partir del conteo de los contactos de tipo recto, cóncavo-convexo y suturado, obteniéndose valores de 0.0737 hasta 0.845. El CI se calculó mediante la ecuación (2), promediando todos los contactos identificados para cada grano, se obtuvieron valores de 1.298 hasta 1.0503. Se observa una disminución de los valores mencionados hacia las localidades del Este (fig. 2).

### Conclusiones

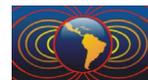
Las diferencias encontradas en los patrones de las fábricas magnéticas entre la base y el techo de la Formación Tunas son consistentes con las diferencias estratigráficas, estructurales y de compactación, presentes en la cuenca de depositación. En las localidades ubicadas hacia el Este de la cuenca donde los estratos son más jóvenes, y las magnetizaciones son sintectónicas con un 85% de despliegue, los ejes  $K3$  están casi en la vertical, evidenciando fábricas 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 y magnetizaciones sintectónicas al 35% de despliegue, los ejes  $K3$  tienden a ubicarse en la horizontal y perpendicular a los ejes de los plegamientos, evidenciando claramente la influencia de los esfuerzos tectónicos actuantes al momento de la depositación de los sedimentos. Todas estas evidencias geológicas estarían indicando que la deformación en la región actuó desde el SW 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. Esto confirma los conceptos y propuesta previamente planteados por Tomezzoli (1999, 2001, 2012).

Los valores de CI y de TPI muestran una disminución hacia las localidades ubicadas al Este, dando como resultado profundidades menores. Esto es ocasionado por una menor presión sufrida por los niveles analizados, lo cual puede explicarse por dos factores: una disminución de la presión de compactación dada por una menor profundización de los sedimentos depositados hacia el Este, debido a que se encuentran en posiciones estratigráficas más altas de la secuencia, o una menor presión de deformación debido a la atenuación de la deformación hacia el antepaís y en el tiempo (hacia el Este).

El efecto de estos dos factores disminuyendo hacia el Este queda corroborado en la fábrica de la roca manifestada a través de sus diferentes contactos y con los resultados de anisotropía de susceptibilidad magnética previamente expuestos.

### Referencias

- Andreis, R.R., Lluch, J.J. e Iñiguez Rodríguez, A.M., 1979. Paleocorrientes y paleoambientes de las Formaciones Bonete y Tunas, Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Actas 6° Congreso Geológico Argentino*, Buenos Aires. 2, 207-224.
- Archangelsky, S. y Cúneo, R., 1984. Zonación del Pérmico continental de Argentina sobre la base de sus plantas fósiles, 3° Congreso Latinoamericano Paleontológico, México. *Memoria*, 143-153.
- Arzadún, G. y Cesaretti, N.N., 2009. Predicción de profundidades de soterramiento de la Formación Tunas (Carbo-Pérmico, Sierras Australes-Cuenca de Claromecó, Argentina) a partir del índice de empaquetamiento cerrado (TPI). V Congreso Latinoamericano de Sedimentología y I Congreso Venezolano de Geocientíficos del Petróleo. Puerto La Cruz, Venezuela. 13-15/05/09. Eds. R. Aquino, N. Santiago, R. Ramírez, M. Delgado y M. Herrera. Venezuela, p.22
- Arzadún, G., Tomezzoli, R.N., Cesaretti, N.N., 2011. Análisis de anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS) en la Formación Tunas, Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Latinmag Letters, Volume 1, Special Issue, D15*, 1-6. Proceedings Tandil, Argentina.



- Borradaile, G.J., 1988. Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics*. 156, 1-20.
- Gleizes, G., Nédélec, A., Bouchez, J.L., Autran, A. y Rochette, P., 1993. Magnetic susceptibility of the Mount Louis-Andorra ilmenite type granite (Pyrenees): a new tool for the petrographic characterization and regional mapping of zoning granite plutons. *Journal of Geophysical Research*. 98, 4317-4331.
- Graham, J.W., 1954. Magnetic susceptibility, an unexploited element of petrofabric. *Geological Society of American Bulletin* 65, 1257-1258.
- Harrington, H.J., 1947. Explicación de las Hojas Geológicas 33m y 34m, Sierras de Curamalal y de la Ventana, Provincia de Buenos Aires. *Servicio Nacional de Minería y Geología, Boletín* 61, p. 56.
- Lesta P. y Sylwan, C., 2005. Cuenca de Claromecó. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Simposio Frontera Exploratoria de la Argentina, pp. 217-231. Eds: Chebli, G.A., Cortiñas, J.S., Spalletti, L.A., Legarreta, L., Vallejo, E.L.
- Taylor, J.M., 1950. Pore-space reduction in sandstones. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, Vol. 34, No. 4, 701-716.
- Tomezzoli, R.N., 1997. Geología y Paleomagnetismo en el ámbito de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, 306 pp. (inédito).
- Tomezzoli, R.N., 1999. La Formación Tunas en las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires. Relaciones entre sedimentación y deformación a través de su estudio paleomagnético. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 54 (3), 220-228.
- Tomezzoli, R.N, 2001. Further Palaeomagnetic results from the Sierras Australes fold and thrust belt, Argentina. *Geophysical Journal International*, 147, 356-366.
- 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. y Cristallini, E.O., 1998. Nuevas evidencias sobre la importancia del fallamiento en la estructura de las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 53(1), 117-129.
- Tomezzoli, R.N. y Cristallini, E.O., 2004. Secciones estructurales de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires: Repetición de la secuencia estratigráfica a partir de fallas inversas? *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59(2), 330-340.
- Tomezzoli, R.N y Vilas, J. F., 1999. Paleomagnetic constraints on age of deformation of the Sierras Australes thrust and fold belt, Argentina. *Geophysical Journal International*, 138, 857-870.
- Wilson, J.C. and McBride, E.F., 1988. Compaction of porosity evolution of Pliocene sandstones, Ventura basin, California. *A.A.P.G. Bull.*, v. 72, 664-681.