

III Encuentro de Jóvenes Investigadores "*Jóvenes investigadores, por una ciencia con compromiso social*"

**DEFORMACIÓN ANDINA EN EL EXTREMO NORTE DE LA SIERRA
DE VALLE FÉRTIL-LA HUERTA**

Estudios de la Tierra y el Espacio, Cambio Climáticos y Naturales. Catástrofes Naturales

Gustavo Federico Ortiz

Grupo de Sismotectónica-CIGEOBIO-CONICET-UNSJ. gfortiz@unsj-cuim.edu.ar

INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTACIÓN

La deformación del retroarco andino durante el Cenozoico se caracteriza por patrones regionales espacio-temporales de acortamientos complejos (ej. Ramos et al., 2002) y el engrosamiento de la corteza continental (Introcaso et al., 1992). Esto ha sido interpretado como el resultado de la interacción entre la geometría de subducción de la placa de Nazca bajo Sudamérica (Barazangi e Isacks, 1976; Jordan et al., 1983), la velocidad de acortamiento cortical (Brooks et al., 2003) y la presencia de estructuras pre-existentes (Ramos, 1994; Alvarado et al., 2009). A escala global, los sistemas convergentes que se observan en varias partes del mundo están representados por cadenas montañosas imponentes tanto antiguas como modernas (DeCelles et al., 2009). Sin embargo, los modelos de deformación continental propuestos en zonas de subducción (Coney y Reynolds, 1977; Farias et al., 2010; Armijo et al., 2010) no explican suficientemente la diversidad y magnitud de las estructuras de retroarco, constituyendo la principal motivación de este trabajo en cuanto a la necesidad de cuantificar y comprender el desarrollo de los cinturones orogénicos.

El actual modelo estructural de Sierras Pampeanas (Orientales y Occidentales) tiene su origen en los trabajos pioneros de González Bonorino (1959a, b). Así mismo, el levantamiento de los bloques de basamento cristalino de las Sierras Pampeanas ha sido relacionado con la migración y expansión de la actividad magmática del arco andino en el antepaís (Jordan et al., 1983; Kay y Mpodozis, 2002). En este sentido, se han encontrado ejemplos recientes de actividad magmática de 7 a 2,6 Ma, Pocho y El Morro, respectivamente (Fig. 1) y fallamiento inverso asociados a los bloques de basamentos de las Sierras Pampeanas de San Luis y Córdoba (Gordillo y Lencinas, 1979; Kay y Gordillo, 1994). El debilitamiento termal de la corteza, provocado por la migración hacia el este del arco magmático, habría elevado la superficie frágil-dúctil (nivel de despegue más profundo) produciéndose así el levantamiento del basamento (tectónica de piel gruesa) de las Sierras Pampeanas. Así, el debilitamiento térmico parecería competir con el control que ejerce el esfuerzo compresivo horizontal andino que se ve incrementado por la posición horizontal de la losa subducida, para producir la deformación y levantamiento de las Sierras Pampeanas (Martino, 1988; Ramos et. al., 2002). En este trabajo se propuso investigar cómo influyen estos factores en un sector de la sierra de Valle Fértil-La Huerta (SVFH) a partir

de datos de termocronología para caracterizar la deformación espacio-temporal de la misma.

Para la zona de trabajo debe mencionarse un estudio anterior de termocronología de Coughlin et al. (1998). Sin embargo, el trabajo citado presenta un carácter muy regional ya que estudió a un conjunto de sierras tales como Famatina, Umango, Maz y Valle Fértil (Figura 1). Además, utilizó una técnica solamente, consistente en termocronómetros de alta temperatura como traza de fisión en apatito, lo cual representa una limitación ya que éstos no son sensibles a la deformación ocurrida durante la tectónica andina. Así, se desconocía hasta el presente el patrón de la deformación actual o más reciente en esta región de las Sierras Pampeanas Occidentales. Trabajos de Bense et al., 2013 utilizaron termocronología de baja temperatura como trazas de fisión y dataciones (U-Th)/He en apatitos, en este caso, sus resultados mostraron edades variadas de exhumación tanto antiguas como jóvenes para el sector centro y sur de la sierra de Valle Fértil-La Huerta (SVFH). Para el sector central de la SVFH las edades (U-Th)/He varían entre el Pérmico inf. (293,5 Ma) y el Paleoceno inf. (62,9 Ma), mientras que para la parte sur se muestran edades jóvenes correspondientes al Plioceno (5,1 Ma).

En los últimos años han sido efectuados estudios de función del receptor por diversos autores en sectores aledaños a la SVFH (Alvarado et al., 2005, Anderson et al., 2007 y Gans et al., 2011), demostrando una corteza sobre-engrosada de ~50 km por debajo de este sector, que luego decrece alrededor de 35 km hacia el este en dirección a la faja plegada y corrida de Precordillera. Además dos diferentes niveles de despegue (alrededor de los ~12 y ~28 km) fueron propuestos para sectores de la corteza media debajo de la SVFH (Giozza, 2011).

Estudios sísmicos para el terremoto de Caucete de 1977 indican que el mismo consistió de una doble fuente sísmica con dos eventos separados por cerca de 21 segundos y alrededor de 65 km, liberándose mayor energía en el segundo (evento principal) (Kadinsky-Cade et al., 1985; Langer y Bollinger, 1988). Si bien la principal deformación ocurrió bajo la sierra de Pie de Palo (SPP), estudios de nivelación y sísmicos han mostrado también la ocurrencia de réplicas de magnitud Mw 5.8 asociados a la activación de fallamiento superficial (~6 km) buzante al este (~65°) bajo el extremo sur de la SVFH situada al este de la SPP (Langer y

Bollinger, 1988). Estos autores asignaron una tasa de acortamiento promedio del orden de 10 mm/año para esta región de las Sierras Pampeanas.

Los resultados obtenidos permitieron profundizar el conocimiento del levantamiento durante la orogenia andina para un sector de las Sierras Pampeanas, como es el extremo norte de la sierra de Valle Fértil. En trabajos futuros se espera cuantificar un modelo evolutivo de la deformación de piel gruesa que integre las observaciones a escala de corteza y litósfera en cuanto a su relación con la horizontalización de la placa de Nazca subducida.

DESARROLLO

Ubicación

El área de trabajo se localiza en el sector noreste de la provincia de San Juan, más precisamente a 30°15'S en el extremo norte de la sierra de Valle Fértil (Fig. 1), ubicada en el Departamento homónimo, distando 220 km aproximadamente de la ciudad capital de San Juan en dirección noreste y 50 km de la ciudad de San José de Jáchal en dirección este.



Figura 1. Mapa regional mostrando el segmento central de los Andes y su división en diferentes terranes, separados por su correspondiente zona de sutura, marcada por líneas de trazos negros. Los contornos sólidos denotan la zona de Wadati-Benioff (Anderson et al., 2007). El área encerrada por la línea de trazos roja corresponde a la sierra de Valle Fértil-La Huerta. Además SU: Sierra de Umango, SM: Sierra de Maz, SF: Sierra de Famatina.

Es posible acceder a la zona de estudio aprovechando la construcción de un tramo del "Corredor Bioceánico" en la Provincia de San Juan perteneciente a la Ruta

Nacional N°150. La misma se encuentra bajo construcción pero se puede acceder a ella contando con los respectivos permisos de ingreso a la obra. Específicamente, el tramo de la Ruta Nacional N°150 que atraviesa la sierra de Valle Fértil une los departamentos de Jáchal y Valle Fértil, sirviendo de entrada al Parque Provincial Ischigualasto, situado a escasos kilómetros del área de trabajo.

Marco geotectónico

La sierra de Valle Fértil-La Huerta se localiza en el extremo occidental de las Sierras Pampeanas. Inicialmente Caminos, 1979 definió al basamento como un zócalo formado por metamorfitas, granitos y rocas de mezcla de edad Precámbrica a paleozoica inferior. Estudios posteriores relacionan esta asociación de rocas ígneas y metamórficas como pertenecientes al arco volcánico Famatiniano (ca. 490 - 460 Ma) vinculado con la acreción del terreno Precordillera ó Cuyania sobre el borde occidental de Gondwana (Otamendi et al., 2012, Pankhurst et al., 1998, Vujovich y Kay, 1996, Dahlquist et al., 2008, Caminos et al., 1982; Mitre, 1971). Castro de Machuca et al. (2007) proponen una edad silúrica para la cizalla en el este de la sierra de La Huerta (ver fig. 1) representando un estadio tardío y/o final de esta colisión. Durante el Carbonífero - Pérmico, el sector de la Sierra habría permanecido lo suficientemente elevado para proporcionar depósitos sedimentarios continentales correspondientes al Grupo Paganzo (Hünicken et al., 1981). Los procesos de rifting del Mesozoico producen una serie de cuencas profundas elongadas que luego fueron rellenadas con sedimentos fosilíferos triásicos así como también rocas volcánicas cretácicas alcanzando espesores de varios kilómetros (Zapata 1996; Azeglio et al, 2008; Gimenez et al., 2000). Los esfuerzos compresivos posteriores, producto de la convergencia entre las placas Sudamericana y de Nazca a una velocidad relativa de 68 mm/año según un acimut de 76° (Argus *et al.*, 2010), habrían producido la deformación de piel gruesa con inversión de fallas y otras estructuras mayores (suturas) (Snyder et al., 1990; Ramos, 1994) aunque aún se desconoce el tiempo de exhumación durante la tectónica andina. Estudios regionales litosféricos basados en información sismológica han mostrado la estructura de corteza desde la costa chilena en el antearco hasta la región central de las Sierras Pampeanas de Córdoba (Gilbert et al., 2006). Estos estudios muestran un espesor de corteza de al menos 50 km de espesor y discontinuidades intracorticales en las Sierras Pampeanas Occidentales dentro de la provincia de San Juan (Gans et al., 2011).

Metodología

Termocronología (U-Th)/He en apatitos

Este método está basado en la acumulación de ^4He producido durante el decaimiento radioactivo de ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th en los cristales de apatito. El ^4He es un gas altamente móvil a temperaturas por encima de los 80°C y, debido a su alta movilidad, se pierde por difusión a través de la red cristalina. Sin embargo por debajo de los 55°C , el apatito comienza a retener el ^4He y consecuentemente es acumulado en la red cristalina durante la exhumación de las rocas hacia su paso a la superficie. Este rango de temperaturas, donde el ^4He es parcialmente retenido, es conocido como "Zona de Retención Parcial" (PRZ, por sus siglas en inglés) (Wolf et al., 1996; Farley, 2002; Reiners et al., 2004). La comparación con modelos de computadoras nos ayudan a restringir las curvas de tiempo- temperatura para una muestra en particular y de este modo obtener la historia térmica de exhumación que mejor ajusta para una edad (U-Th)/He de cristal dada (Ketchum, 2005)

Los cristales de apatitos deben ser cuidadosamente seleccionados con la finalidad de evitar inclusiones fluidas y minerales, ricas en U y Th, que pudieran producir un error en las edades por exceso de ^4He (por ej, zircón, monacita). Se toman imágenes de los cristales usando un circuito cerrado de fotografía montado al microscopio con la finalidad de realizar técnicas de medición y así calcular un factor de corrección por la eyección de partículas alfa (Farley et al., 1996).

Toma y análisis de las muestras

Para este trabajo se recolectaron trece muestras para análisis termocronológicos (U-Th)/He en apatitos, sin embargo diez de ellas no contenían una buena calidad en sus cristales para realizar las dataciones. Las muestras se recolectaron de afloramientos a lo largo de la Ruta Nacional N° 150 y consisten principalmente rocas sedimentarias Carboníferas y Triásicas, de las cuencas del Grupo Paganzo e Ischigualasto-Villa Unión, respectivamente, al norte de la SVFH. Como resultado de la litología se trabajo con apatitos detríticos, no obstante se obtuvieron excelentes resultados.

La preparación de las muestras y la extracción del gas se llevo a cabo en el Laboratorio de Dataciones de Helio Radiogénico de Arizona (ARHDL, por sus

siglas en inglés) perteneciente a la Universidad de Arizona, Estados Unidos. Para los análisis de (U-Th)/He, los cristales de apatitos fueron recogidos a mano siguiendo estrictos criterios de selección, como describe Farley (2002), fueron fotografiados y medidos. Los cristales seleccionados fueron desgasificados en vacío usando un láser con posterior análisis de He usando un espectrómetro de masas cuadrupolo. Finalmente se determinó la abundancia de U y Th de los cristales utilizando espectrometría de masa (ICP-MS).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo para las muestras en el sector norte de la SVFH indican edades de exhumación jóvenes, que varían entre los 2,2 y 3,8 Ma (Plioceno). Mientras que Bense et al., 2013 obtuvieron edades (U-Th)/He en apatitos que varían desde ~294 Ma (Pérmico inf.) y ~5.1 Ma para los sectores central y sur, respectivamente (Bense et al., 2013).

Por lo tanto, a partir del análisis termocronológico sobre la exhumación y levantamiento, es posible inferir la influencia de la tectónica andina hacia los extremos norte y sur del sistema serrano durante la horizontalización de la placa de Nazca. Sin embargo las edades de exhumación antiguas en su porción central estarían indicando que este sector habría permanecido de manera superficial en la corteza superior y por debajo de los 85° C (dentro de los 3 kilómetros), a una profundidad suficiente para no alcanzar el reseteo total del sistema (U-Th)/He. Además es importante destacar que a raíz de estos resultados, y en comparación con los datos sísmicos, se resuelve a la sierra de Valle Fértil-La Huerta como una importante zona sismogénica que estaría actuando de zona de relajación de esfuerzos para este sector situado al este de la Faja Plegada y Corrida de Precordillera.

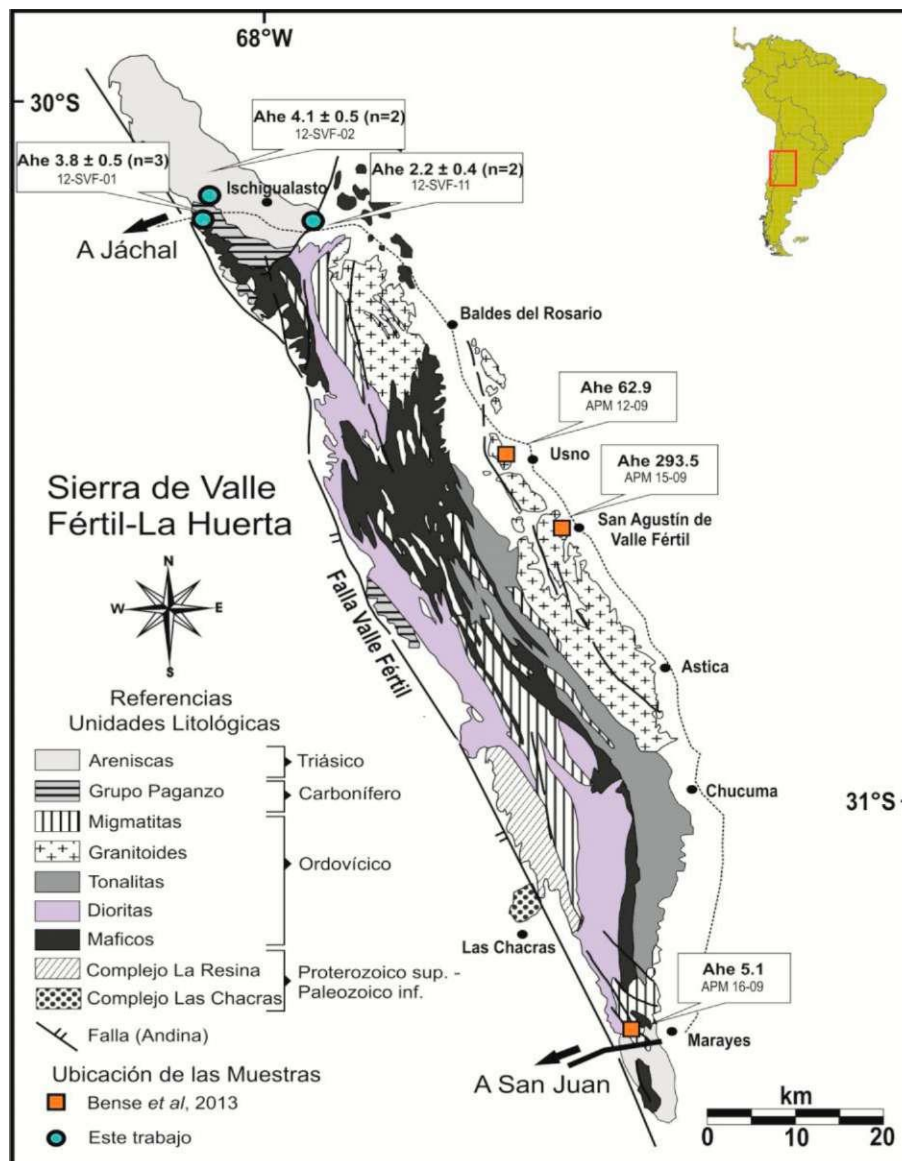


Figura 2. Mapa geológico esquemático de la sierra de Valle Fértil-La Huerta (modificado de Otamendi *et al.*, 2009). Se denotan las localizaciones de los sitios muestreados con sus respectivas edades (U-Th)/He en Ma en apatitos según Bense *et al.* (2013) y según este trabajo. En este estudio los errores corresponden a $2c$ (el doble de la desviación estándar) de las edades medias ponderadas.

Bibliografía

Alvarado, P., S. Beck, G. Zandt, M. Araujo, y E. Triep, 2005. Crustal deformation in the south-central Andes backarc terranes as viewed from regional broad-band seismic waveform modeling, *Geophysical Journal International*, 163, 580-598.

Anderson, M., Alvarado, P., Zandt, G., Beck, S., 2007. Geometry and brittle deformation of the subducting Nazca Plate, Central Chile and Argentina,

Geophys. J. Int. (2007) 171, 419-434.

Argus, D., Gordon, G., Heflin, M., Ma, C., Eanes, R., Willis, P., Peltier R. y Owen, S., 2010. The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's centre from space geodesy. *Geophysical Journal International* 180: 913 - 916. **Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R. y Kausel, E., 2010.** The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile, *Tectonics* 29(TC2007). doi:10.1029/2008TC002427. **Azeglio, E., Gimenez, M. e Introcaso, A., 2008.** Análisis de subsidencia de la cuenca de las Salinas, Sierras Pampeanas Occidentales. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63, 2, 112-120.

Barazangi, M. y Isacks, B.L., 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4: 686 - 692. **Bense, F. A., Löbens, S., Dunkl, I., Wemmer, K. y Siegesmund, S. 2013.** Is the exhumation of the Sierras Pampeanas only related to Neogene flat-slab subduction? Implications from a multi-thermochronological approach. *Journal of South American Earth Sciences*, 48: 123-144

Brooks, B.A., Bevis, M., Smalley, R., Jr., Kendrick, E., Manceda, R., Lauría, E., Maturana, R. y Araujo, M., 2003. Crustal motion in the southern Andes (26°-36°S): do the Andes behave like a microplate?, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4, 1-14.

Caminos, R., 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales, Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. En: 2do Simposio de Geología Regional Argentina (R. Caminos Ed.), Academia Nacional de Ciencias, Vol. 1: 225-291. Córdoba

Castro de Machuca, B., Arancibia, G., Morata, D., Belmar, M., Previley, L. and Pontoriero, S. 2007. P-T-t evolution of an Early Silurian medium-grade shear zone on the west side of the Famatinian magmatic arc, Argentina: implications for the assembly of the Western Gondwana margin. In Casquet, C. and Pankhurst (eds.) Special Issue, The West Gondwana margin: Proterozoic to Mesozoic. *Gondwana Research* 13 (2): 216-226

Coney, P.J., y S.J. Reynolds, 1977. Cordilleran Benioff zones, *Nature*, 270 (5636), 403-406.

Coughlin, T., O'Sullivan, P., Kohn, B. y Holcombe, R., 1998. Apatite fission-track thermochronology of the Sierras Pampeanas, central western Argentina: Implications for the mechanism of plateau uplift in the Andes. *Geology*; November 1998; v. 26; no. 11; p. 999-1002.

Dahlquist, J.A., Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Galindo, C., Alasino, P., Fanning, C.M., Saavedra, J. y Baldo, E., 2008. New SHRIMP U-Pb data from the Famatina Complex: constraining Early-Mid Ordovician Famatinian magmatism in the Sierras Pampeanas, Argentina. *Geologica Acta*, 6(4), 319-333. **DeCelles, P.G., Ducea, M.N., Kapp, P., y Zandt, G., 2009.** Cyclicality in Cordilleran orogenic systems: *Nature Geoscience*, v. 2, p. 251-257. **Ehlers, T.A., y Farley, K.A., 2003.** Apatite (U-Th)/He thermochronometry: methods and applications to problems in tectonic and surface processes: *Earth Planetary Science Letters*, v. 206, p. 1-14.

Farías, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., David, C., Tassara, A., Tapia, F. y Fock, A., 2010. Crustal scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building, *Tectonics* 29 (TC3006). doi:10.1029/2009TC002480. **Gans, C., Beck, S., Zandt, G., Gilbert, H., Alvarado, P., Anderson, M. and Linkimer, L., 2011.** Continental and oceanic crustal structure of the Pampean flat slab region, western Argentina, using receiver function analysis: new high-resolution results. *Geophysical Journal International*. 186, 45-58, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05023.

Gilbert, H.J., Beck, S. y Zandt, G., 2006. Lithospheric and upper mantle structure of central Chile and Argentina. *Geophys. J. Int.* 165(1), 383-398. www.geo.arizona.edu/CHARGE y www.geo.arizona.edu/SIEMBRA **Gimenez, M., Martinez, M. P., y Introcaso, A., 2000.** A Crustal Model based mainly on Gravity data in the Area between the Bermejo Basin and the Sierras de Valle Fertil-Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*. 13: 275-286. **Giozza, G., 2011.** Determinación de la estructura de velocidades sísmicas a partir de la función del receptor en el flanco oriental de la sierra de Valle Fértil-La Huerta. Tesis de Licenciatura en Geofísica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. p. 87

González Bonorino, F., 1950a. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 5(3): 81-110. Bs. As. **González Bonorino, F., 1950b.** Descripción Geológica de la Hoja 13e, Villa Alberdi, provincia de Tucumán. Dirección Nacional de Minería, Boletín 74. Bs. As.

Gordillo y Lencinas, 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En Turner, J.C. (De.): Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, Vol. I., 2: 577-650. Córdoba.

Introcaso, A., Pacino, M.C. y Fraga, H., 1992. Gravity, isostasy and Andean crustal shortening between latitudes 30° and 35°S, *Tectonophysics*, 205, 31-48. **Jordan, T.E., Isacks, B.L., Allmendinger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A., and Ando, C.J., 1983.** Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate: GSA Bulletin, v. 94, p. 341-361.

Kadinsky-Cade, K., Reilinger, R. y Isacks, B. L., 1985. Surface deformation associated with the November 23, 1977, Caucete, Argentina earthquake sequence. *J. Geophys. Res.*, 90: 12691-12700.

Kay, S. M. y Gordillo, E., 1994. Pocho volcanic rocks and the melting of depleted continental lithosphere above a shallowly dipping subduction zone in the Central Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117(1):25-44. **Kay, S.M. y Mpodozis, C., 2002.** Magmatism as a probe to the Neogeneshallowing of the Nazca plate beneath the modern Chilean flat-slab, *J. South Am. Earth Sci.*, 15, 39-57.

Ketcham, R.A., Donelick, R.A., Carlson, W.D., 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales: *American Mineral*, v. 84, p.1235-1255.

Langer, C. J. y Bollinger, G. A., 1988. Aftershocks of the western Argentina (Caucete) earthquake of 23 November 1977: some tectonic implications. *Tectonophysics*, 148: 131-146.

Martino, R.D., 1988. Geología y petrología del basamento metamórfico de la región situada al norte de Cuchilla Nevada, sierra Grande de Córdoba. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba (inédita). **Mitre, J. C., 1971.** Caracterización de una comarca de metamorfismo regional de alto grado: la sierra de Valle Fértil, provincia de San Juan, República Argentina, *Asociación Geológica. Argentina Rev.* 26, 1, 113-127.

Ortiz, G., Fosdick, J y Alvarado, P., 2014. Edades termocronológicas en la sierra de Valle Fértil-La Huerta: Resultados preliminares de dataciones (U-Th)/He en apatitos. XIX Congreso Geológico Argentino, Córdoba, Argentina, 1395-1396. **Otamendi, J., Ducea, M. y Bergantz, G., 2012.** Geological, petrological and geochemical evidence for progressive construction of an arc crustal section, Sierra

de Valle Fértil, Famatinian Arc, Argentina. *Journal of Petrology*, 53, 4, pp.761-800.
doi:10.1093/petrology/egr079

Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Saavedra, J., Baldo, E., Dahlquist, J., Pascua I. y Fanning, C.M., 1998. The Famatinian magmatic arc in the central Sierras Pampeanas. En Pankhurst, R.J. and C.W. Rapela (Eds.): *The Proto-Andean Margin of South America*, vol 142: 343-368. Special Publication of the Geological Society. London.

Ramos, V.A., Cristallini, E.O., y Pérez, D.J., 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, p. 59-78. **Snyder, D.B., Ramos,**

V.A. y Allmendinger, R.W., 1990. Thick-skinned deformation observed on deep seismic reflection profiles in western Argentina, *Tectonics*, 9, 773 - 788.

Vujovich, G.I. y Kay, S.M., 1996. Evidencias geoquímicas del origen y ambiente geológico de las rocas metamórficas de composición máfica a intermedia de las Sierras Pampeanas Occidentales. 13° Cong. Geol. Argentino and 3° Cong. Explorac. Hidrocarburos, Actas, 5, pp. 273-291.

Wolf, R.A., Farley, K.A., and Silver, L.T., 1996. Helium diffusion and low- temperature thermochronometry of apatite: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 60, p. 4231-4240.

Zapata y Allmendinger, 1996. Thrust-Front Zone of the Precordillera, Argentina: A Thick-Skinned Triangle Zone, *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 80 (3): 359-381.

Zapata, T.R., 1998. Crustal structure of the Andean thrust front at 30° S latitude from shallow and deep seismic reflection profiles, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 11(2): 131-151.