



EL OROCLINO PATAGÓNICO

F. Poblete^{1,2*}, P. Roperch^{2,3}, C. Arriagada¹, C. Ramírez de Arellano⁴, F. Hervé^{1,4}

¹ Departamento de Geología, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

² Université de Rennes I, Géosciences Rennes, 35042 Rennes Cedex, France.

³ CNRS (CNRS/INSU) UMR 6118, Géosciences Rennes, 35042 Rennes Cedex, France.

⁴ Carrera de Geología, Universidad Andres Bello, Salvados Sanfuentes 2375, Santiago, Chile

* e-mail: Ferpoble2@gmail.com

ABSTRACT

One of the main characteristics of the Austral Andes is the bending of this orogen and their main tectonic provinces, from a N-S orientation to a ~W-E in Tierra del Fuego. Few paleomagnetic studies have been carried out in the region, and its origin is still matter of controversy. In this contribution we present new paleomagnetic results from sampling between 54° S and 55° S. We drilled 61 sites in volcanic and sedimentary rocks of Early Jurassic age and in intrusive rocks of Cretaceous-Eocene age which belong to the Fuegian batholith. Results from the sedimentary and interbedded volcanic rocks suggest a remagnetization event during the mid-Cretaceous and ~90° CCW rotation. Intrusive rocks of mid-Cretaceous age record >90° of CCW rotation, while intrusive rocks of Late Cretaceous-Eocene record CCW rotations between ~45 and ~30°. These results suggest a systematic pattern of rotation—the Fuegian Rotation Pattern—and that the curvature of the Patagonian Orocline was acquired in two steps: a first stage during the closure of the Rocas Verdes basin, and a second stage concomitant with the exhumation of Cordillera Darwin metamorphic complex and the advance of the fold and thrust belt to the foreland.

Keywords: Patagonia, Patagonian Orocline, Meso-Cenozoic, Paleomagnetism, Fuegian Rotation Pattern

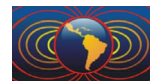
RESUMEN

Una de las principales características de los Andes Australes es la curvatura del orógeno y de sus principales provincias tectónicas, desde una orientación N-S a los 50° S a una orientación W-E en Tierra del Fuego. Pocos estudios paleomagnéticos han sido llevados a cabo en la región, por lo que el origen de esta curvatura aún es tema de discusión. En esta contribución presentamos nuevos resultados paleomagnéticos obtenidos entre los 54° S y los 55° S. Se perforaron 61 sitios en rocas volcánicas y sedimentarias de edad Jurásico Tardío - Cretácico Temprano y en intrusivos de edad Cretácico-Eoceno del Batolito Fueguino. Los resultados obtenidos en sedimentos y rocas volcánicas sugieren un evento de remagnetización y ~90° de rotación antihoraria. En intrusivos de edad Cretácico medio, la magnitud de las rotaciones es >90° en sentido antihorario, mientras que los intrusivos de edad Cretácico Tardío - Eoceno registran rotaciones entre ~45° y ~30°. Estos resultados muestran un patrón sistemático de rotaciones -el patrón de rotaciones Fueguino- y sugieren que la curvatura habría sido adquirida en dos etapas: una primera etapa durante el cierre y colapso de la Cuenca de Rocas Verdes, y una segunda etapa concomitante a la exhumación de la Cordillera Darwin.

Palabras Clave: Patagonia, Oroclinal Patagónico, Meso-cenozoico, Paleomagnetismo, patrón de rotaciones fueguino

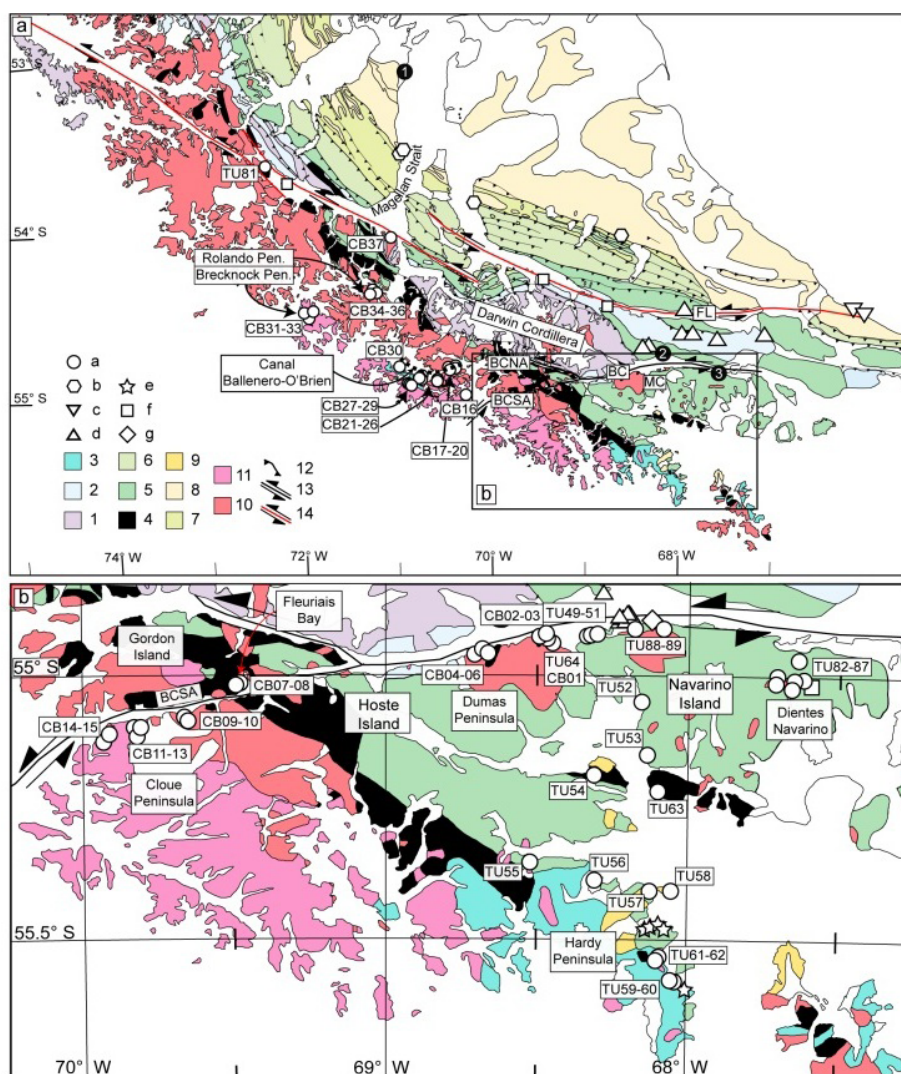
Introducción

Los Andes Australes de Patagonia y Tierra del Fuego presentan una prominente forma arqueada: El Oroclino Patagónico. A pesar que esta estructura fue descrita hace casi 100 años, pocos estudios paleomagnéticos han



sido realizados para determinar posibles rotaciones al sur de la falla Magallanes Fagnano (Burns *et al.*, 1980; Cunningham *et al.*, 1991; Dalziel *et al.*, 1973; Rapalini *et al.*, 2015) y su origen sigue siendo tema de controversia (Rapalini, 2007). Las rotaciones observadas han sido interpretadas como evidencias de plegamiento oroclinal de Patagonia, y relacionadas con el colapso de la cuenca de Rocas Verdes (Burns *et al.*, 1980; Dalziel *et al.*, 1973). Sin embargo, otros estudios han sugerido que la curvatura podría ser producto de una tectónica de rumbo (Cunningham, 1993) o bien una estructura heredada (Ghigliione and Cristallini, 2007).

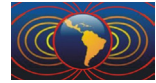
En el área de estudio la extensión, asociada al quiebre de Gondwana, llevó al desarrollo de la cuenca de Rocas Verdes, cuyos remanentes están representados por los complejos pseudo-ofiolíticos de Sarmiento y Tortuga, y el relleno sedimentario de la Formación Yagán. Un arco volcánico, representado por la Formación Hardy, limitaba la cuenca por el oeste (coordenadas actuales). La obducción de la cuenca de Rocas Verdes



Legenda:

1. Basamento Paleozoico.
 2. Rocas Volcanoclásticas Silíceas y Sedimentarias (Formación Tobífera).
 3. Rocas Volcanoclásticas y Volcánicas del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (Formación Hardy);
 4. Complejos Ofiolíticos;
 5. Secuencias sedimentarias del Cretácico Temprano;
 6. Secuencias sedimentarias del Cretácico medio-Tardío;
 7. Secuencias sedimentarias del Cretácico Tardío-Paleoceno.
 8. Secuencias sedimentarias del Eoceno-Plioceno.
 9. Volcanismo Mioceno.
 10. Intrusivos Cretácicos.
 11. Intrusivos Paleocenos.
 12. Intrusivos Miocenos.
 13. Fallas Inversas; 14. Zona de Falla del Canal Beagle.
 15. Zona de Falla Magallanes-Fagnano.
 16. Sinclinales.
 17. Anticlinales.
- Los sitios con resultados paleomagnéticos de los diversos estudios se muestran en símbolos blancos:
- a) Poblete *et al.*, (sometido);
 - b) Poblete *et al.* (2014);
 - c) Maffione *et al.* (2010);
 - d) Rapalini *et al.* (2015);
 - e) Cunningham *et al.* (1991);
 - f) Burns *et al.* (1980); g) Dalziel *et al.* (1973).

Figura 1. Mapa geológico simplificado de las áreas de estudio. Modificado de: (Mpodozis y Rojas, 2006; Olivero y Malumián, 2008; SERNAGEOMIN, 2003; Suárez *et al.*, 1985). BC; Canal Beagle; MC, Canal Murray; IN, Isla Navarino; IH, Isla Hoste; BCNA/BCSA, Canal Beagle Brazo Norte/Brazo Sur.



durante el Cretácico Tardío (Klepeis *et al.*, 2010) causó un aumento en la carga tectónica, marcando el inicio de la cuenca de ante país de Magallanes y de la faja plegada y corrida de Magallanes (Mpodozis *et al.*, 2011). Los batolitos Sur y Fueguino (segmentos australes del Batolito Patagónico) se ubican en el margen occidental de la cuenca de Rocas Verdes (Fig. 1). Estos consisten en leucogranitos peraluminosos del Jurásico Tardío y gabros y granitoides de edad Cretácico Temprano-Cenozoico (Bruce *et al.*, 1991; Hervé *et al.*, 2007; Hervé *et al.*, 1984).

En esta contribución presentamos resultados paleomagnéticos obtenidos en 39 sitios de un total de 61. Los sitios fueron muestreados en rocas del Batolito Fueguino y en sedimentos y rocas volcánicas del Cretácico Temprano ubicadas en el archipiélago Fueguino (sur de la falla Magallanes-Fagnano, Fig. 1). Estos datos, en conjunto con los ya publicados, fueron usados para constreñir la evolución tectónica de la curvatura en Patagonia.

Metodología y muestreo

La magnetización natural remanente (NRM) fue medida usando un magnetómetro criogénico 2G (Rennes) o Molspin (Chile). Posteriormente las muestras fueron desmagnetizadas usando métodos de lavado termal o campos alternos en una habitación aislada magnéticamente. La magnetización en cada etapa fue medida usando el magnetómetro 2G (Rennes). La anisotropía de susceptibilidad fue medida en uno o dos especímenes por testigos usando un kappabridge KLY3 (Agico).

El muestreo paleomagnético se realizó en los canales fueguinos, al sur de la falla Magallanes-Fagnano (Fig. 1). 12 sitios fueron muestreados en rocas sedimentarias y volcánicas de edad Cretácico Inferior (formaciones Yagán y Hardy); 3 sitios en rocas pertenecientes a los complejos ofiolíticos que formaban el piso oceánico de la cuenca de Rocas Verdes. El resto de los sitios (46) fueron muestreados en rocas intrusivas de edad Cretácico Tardío a Eoceno.

Resultados

Las direcciones características en rocas sedimentarias y volcánicas son de polaridad normal y no pasan los test de plegamiento. Las rocas remagnetizadas presentan direcciones características con declinaciones orientadas hacia el oeste y similares a los intrusivos de edad Cretácico medio. Esto sugiere que la remagnetización fue adquirida durante el superciclón de polaridad normal del Cretácico, y relacionada con la deformación y magmatismo ocurrido durante el Cretácico medio. Este evento de remagnetización también ha sido reconocido en la Península Antártica (Poblete *et al.*, 2011). La remagnetización muestra una rotación antihoraria de $\sim 90^\circ$ en el área de Península Hardy (Fig. 2). Esta rotación antihoraria se observa también en intrusivos ubicados en los Dientes de Navarino, Isla Navarino (Fig. 2).

Las direcciones características en sitios obtenidos en rocas del Batolito Fueguino—muestreados en el brazo sur del Canal Beagle, Canal O'Brien, Canal Ballenero y Península Brecknock—corresponden a una magnetización primaria registrada durante el emplazamiento de los plutones y con direcciones antipodales. Las rocas intrusivas de edad Cretácico medio registran rotaciones antihorarias mayores a 90° (Fig. 2). Por otro lado, intrusivos de edad Cretácico Tardío-Eoceno Inferior registran rotaciones entre 45° y 30° aproximadamente (Fig. 2).

Discusión y conclusiones

Una de las mayores dificultades en la interpretación de los datos paleomagnéticos es determinar si las rotaciones observadas son producto de rotaciones de bloques asociadas con una tectónica de rumbo, o bien como un cuerpo rígido.

En la región se ha reconocido una tectónica de rumbo regional asociada con sistemas de falla sinestrales, entre ellas la falla Magallanes-Fagnano y la zona del Canal Beagle, que apoyarían un origen de la curvatura

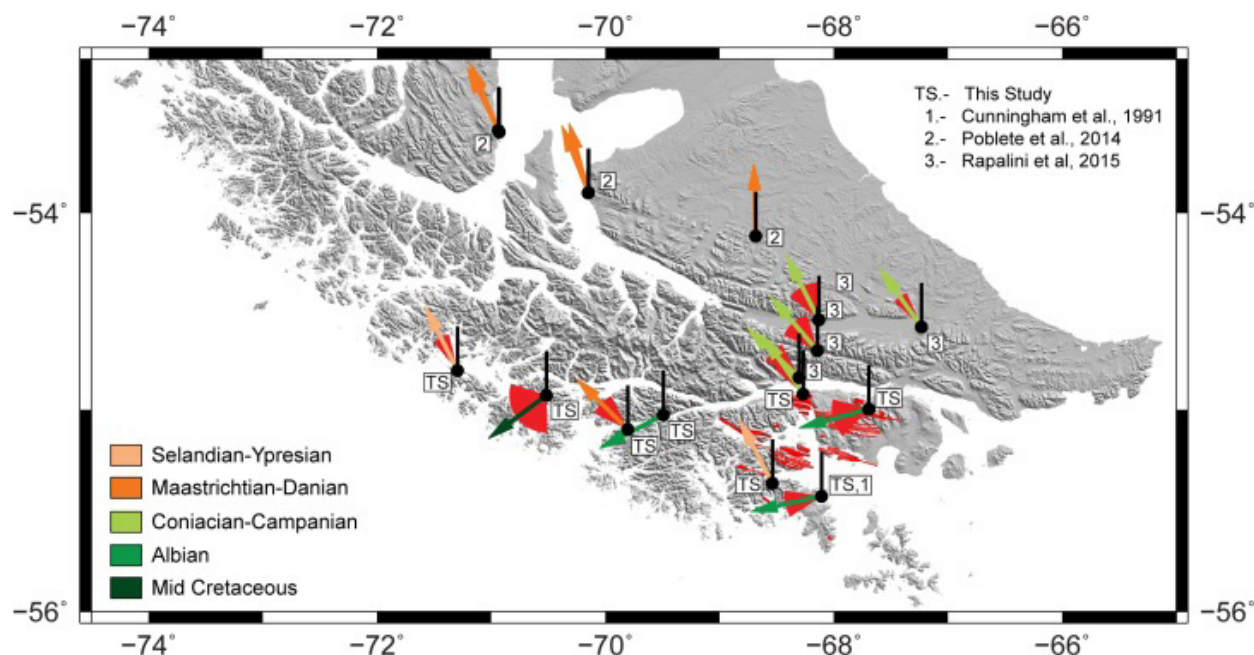
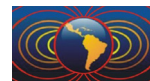


Figura 2. Compilación de rotaciones tectónicas en los Andes Fueguinos y la faja plegada y corrida de Magallanes. Las flechas representan las rotaciones tectónicas calculadas a partir de las direcciones características; en rojo se grafican los errores. El grado de rotaciones es el ángulo entre la flecha y la línea negra de referencia. En rojo, lineamientos estructurales en Isla Navarino y Península Hardy.

asociada con una tectónica de rumbo (Cunningham, 1993). Si bien existen discrepancias sobre la edad del inicio de la transcurrancia, ésta habría comenzado durante o después del Oligoceno (Klepeis *et al.*, 2010; Torres-Carbonell *et al.*, 2008), por lo tanto, posterior a la edad de las rotaciones.

Al considerar todos los datos paleomagnéticos de los canales fueguinos y la isla grande de Tierra del Fuego, vemos que emerge un patrón sistemático de rotaciones, en el cual, la magnitud de éstas estaría controlada temporal y geográficamente (Fig. 2). Esto, sumado al hecho que las rotaciones observadas en Isla Navarino y Península Hardy no desplazan los lineamientos estructurales de la región y a la edad de la transcurrancia, sugiere que el patrón de rotaciones no se debe a una tectónica de rumbo.

Este patrón geográfico-temporal de rotaciones antihorarias en Patagonia sugiere que la formación de la curvatura patagónica estaría relacionada con la rotación de un gran bloque durante el colapso y obducción de la cuenca de Rocas Verdes ocurrido anterior a los 86 Ma (Klepeis *et al.* (2010), Fig. 3). Las rotaciones continuaron durante el Cretácico Tardío y el Paleoceno, concomitante con la exhumación de la Cordillera Darwin y el avance del frente de deformación hacia la cuenca de antepaís (Fig. 3). Durante las últimas etapas de deformación en la faja plegada y corrida de Magallanes no se registran rotaciones (Poblete *et al.*, 2014).

Agradecimientos

Contribución del Proyecto Anillo Antártico ACT-105. Agradecemos a CONAF, DIFROL y la armada chilena por los permisos del muestreo. F.P agradece a CONICYT y el Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

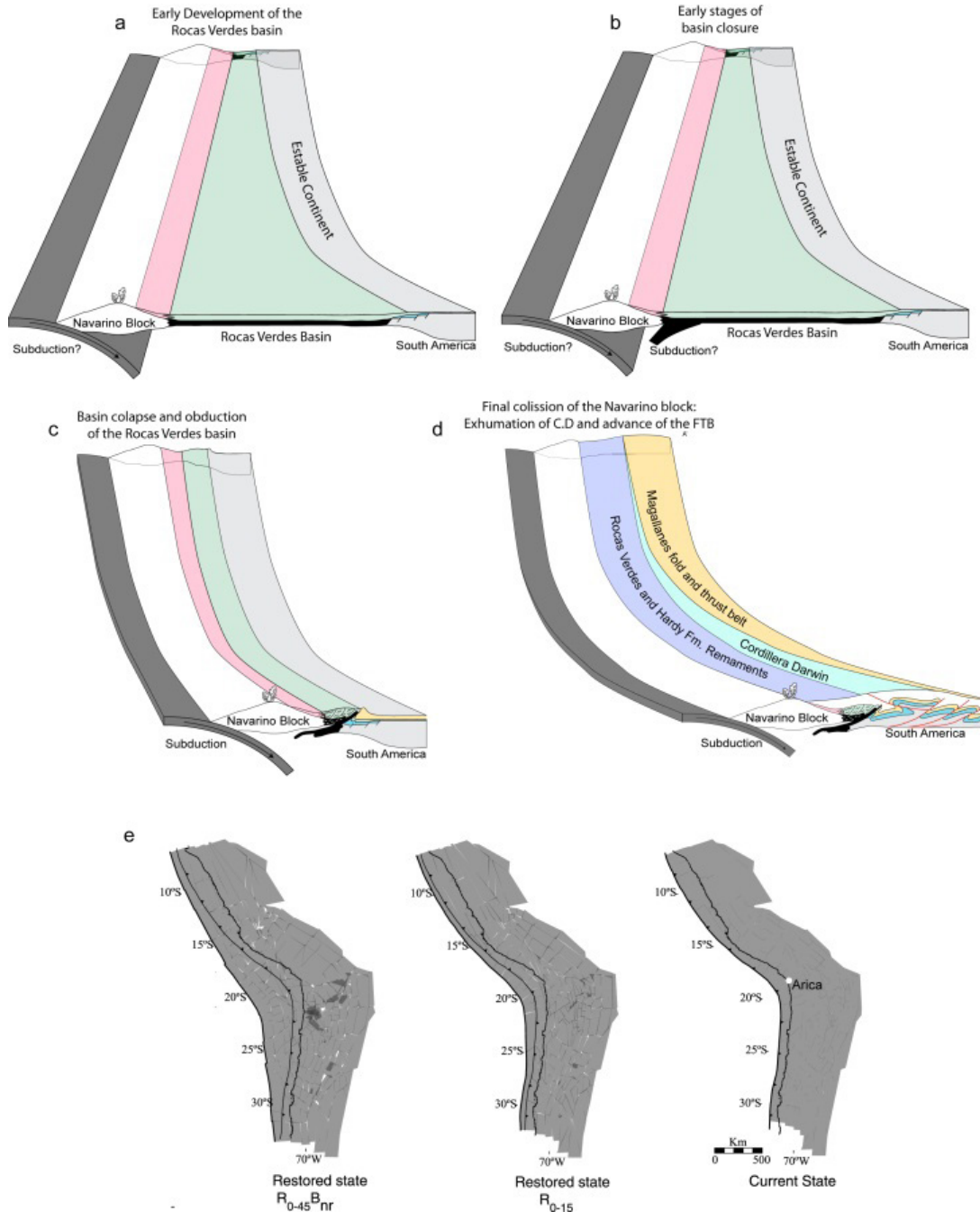
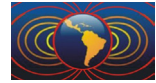
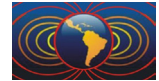


Figura 3: Modelo esquemático de la evolución de los Andes Fuegoles (a-d). Los perfiles en a-d son modificados de Klepeis *et al.* (2010).

Referencias

- Bruce, R.M., Nelson, E.P., Weaver, S.G., Lux, D.R. 1991. Temporal and spatial variation in the southern Patagonian batholith: constraints on magmatic arc development, in: Harmon, R.S., Rapela, C.W. (Eds.), *Andean magmatism and its tectonic setting, Special Paper, Geological Society of America*, v. 265, 1-12.
- Burns, K.L., Rickard, M.J., Belbin, L., Chamalaun, F. 1980. Further palaeomagnetic confirmation of the Magallanes Orocline. *Tectonophysics*, 63, 75-90, doi: 10.1016/0040-1951(80)90108-0.
- Cunningham, W.D. 1993. Strike-slip faults in the southernmost Andes and the development of the Patagonian



- Orocline. *Tectonics*, 12, 169-186, doi: 10.1029/92tc01790.
- Cunningham, W.D., Klepeis, K.A., Gose, W.A., Dalziel, I.W.D. 1991. The Patagonian Orocline: New paleomagnetic data from the Andean Magmatic Arc in Tierra del Fuego, Chile. *J. Geophys. Res.*, 96 (B10), 16061-16067, doi: 10.1029/91jb01498.
- Dalziel, I.W.D., Kligfield, R., Lowrie, W., Opdyke, N.O. 1973. Paleomagnetic data from the southernmost Andes and the Antarctic Andes, in: Tarling, D.H., Runcorn, S.K. (Eds.), *Implications of Continental drift to the Earth Sciences*. Academic Press, New York, pp. 37-101.
- Ghiglione, M.C., Cristallini, E.O. 2007. Have the southernmost Andes been curved since Late Cretaceous time? An analog test for the Patagonian Orocline. *Geology* 35, 13-16, doi: 10.1130/g22770a.1.
- Hervé, F., Pankhurst, R.J., Fanning, C.M., Calderón, M., Yaxley, G.M. 2007. The South Patagonian Batholith: 150 My of granite magmatism on a plate margin. *Lithos*, 97, 373-394, doi: 10.1016/j.lithos.2007.01.007.
- Hervé, M., Suárez, M., Puig, A. 1984. The Patagonian Batholith S of Tierra del Fuego, Chile: timing and tectonic implications. *J. Geol. Soc.*, 141, 909-917, doi: 10.1144/gsjgs.141.5.0909.
- Klepeis, K.A., Betka, P., Clarke, G., Fanning, M., Hervé, F., Rojas, L., Mpodozis, C., Thomson, S. 2010. Continental underthrusting and obduction during the Cretaceous closure of the Rocas Verdes rift basin, Cordillera Darwin, Patagonian Andes. *Tectonics*, 29, 1-24, doi: 10.1029/2009tc002610.
- Maffione, M., Speranza, F., Faccenna, C., Rossello, E. 2010. Paleomagnetic evidence for a pre-early Eocene (~50Ma) bending of the Patagonian orocline (Tierra del Fuego, Argentina): Paleogeographic and tectonic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 289, 273-286, doi: 10.1016/j.epsl.2009.11.015.
- Mpodozis, C., Mella, P., Padva, D. 2011. Estratigrafía y megasecuencias sedimentarias en la cuenca Austral-Magallanes, Argentina y Chile. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.
- Poblete, F., Arriagada, C., Roperch, P., Astudillo, N., Hervé, F., Kraus, S., Le Roux, J.P. 2011. Paleomagnetism and tectonics of the South Shetland Islands and the northern Antarctic Peninsula. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 302, 299-313, doi: 10.1016/j.epsl.2010.12.019.
- Poblete, F., Roperch, P., Hervé, F., Diraison, M., Espinoza, M., Arriagada, C. 2014. The curved Magallanes fold and thrust belt: Tectonic insights from a paleomagnetic and anisotropy of magnetic susceptibility study. *Tectonics*, 33, doi: 10.1002/2014tc003555.
- Rapalini, A. 2007. A paleomagnetic analysis of the Patagonian Orocline. *Geologica Acta* 5, 287-294, doi.
- Rapalini, A.E., Peroni, J., Lупpo, T., Tassone, A., Cerredo, M.E., Esteban, F., Lippai, H., Franciscovilas, J. 2015. Palaeomagnetism of Mesozoic magmatic bodies of the Fuegian Cordillera: implications for the formation of the Patagonian Orocline. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, doi: 10.1144/sp425.3.
- Torres-Carbonell, P.J., Olivero, E.B., Dimieri, L.V. 2008. Control en la magnitud de desplazamiento de rumbo del Sistema Transformante Fagnano, Tierra del Fuego, Argentina. *Rev. geol. Chile* 35, 63-77..