



ESTUDIO DE ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (ASM) EN LA ZONA DE FALLA LIQUIÑE-OFQUI: RESULTADOS PRELIMINARES OBTENIDOS EN EL FIORDO REÑIHUE, REGIÓN DE AYSÉN, CHILE.

T.I. Reyes^{1,2*}, F. Poblete¹, P. Quezada², F. Herve^{1,2}, M. Calderón², R. Panhurst³, C. Rapela⁴, M. Fanning⁵

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

² Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello. Sazie 2119, Santiago, Chile

³ Visiting Research Associate, British Geological Survey, Keyworth, Nottingham NG12 5GG, U.K.

⁴ Centro de Investigaciones Geológicas, Universidad Nacional de la Plata. Diagonal 113, No275, 1900 La Plata, Argentina.

⁵ Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Mills Road, Canberra, ACT 0200, Australia

*e-mail: tomas.reyes@ug.uchile.cl

ABSTRACT

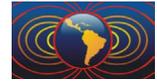
Preliminary results are presented from an AMS study conducted in the Reñihue Fjord, located east of Chiloé Island. 18 sites were collected in Devonian metavolcanic and metasedimentary rocks and in intrusive rocks corresponding to the North Patagonian Batholith of the Neogene Period. Well-defined magnetic fabrics were achieved at 15 of the 18 sites sampled with P' values up to 1.5. Sites in the Loyola-Chumildén sector have oblate ellipsoids with the minimum axis direction (K_{\min}) well grouped, which, in *in-situ* coordinates, has an average declination and inclination of 64.3° and 43.4° respectively, while the sites located in the Chilco Viejo sector, although they also have oblate ellipsoids, the foliation pole has an average direction of declination and inclination, in *in-situ* coordinates, of 267° and 15° respectively. Immediately east of Chilco Viejo are the only sites with prolate fabrics. The similarity of the observed magnetic fabrics, independent of the sampled lithology, and the degree of anisotropy observed in some places, suggest that this would be a tectonic fabric superimposed to the original magnetic fabric. In the case of oblate fabrics, it would have originated synchronously from the intrusive emplacement, while the prolate fabrics would have been acquired after the intrusive emplacement as the product of a local strike-slip tectonics.

Keywords: AMS, Patagonia, Liquiñe-Ofqui.

RESUMEN

Se presentan resultados preliminares de un estudio de ASM realizado en el Fiordo Reñihue, ubicado al este de la Isla de Chiloé. Se recolectaron 18 sitios en rocas metavolcánicas y metasedimentarias de edad Devónico y en rocas intrusivas correspondientes al Batolito Norpatagónico de edad Neógeno. Se lograron obtener fábricas magnéticas bien definidas en 15 de los 18 sitios muestreados con valores P' de hasta 1,5. Los sitios en el sector Loyola-Chumildén presentan elipsoides oblatos con las direcciones del eje mínimo (K_{\min}) bien agrupadas, y que en coordenadas *in-situ* tiene un promedio de declinación e inclinación de 64.3° y 43.4° respectivamente, mientras que los sitios ubicados en el sector de Chilco Viejo, aunque también presentan elipsoides oblatos, el polo de la foliación tienen una dirección promedio de declinación e inclinación, en coordenadas *in-situ*, de 267° y 15° respectivamente. Inmediatamente al este de Chilco Viejo se encuentran los únicos sitios con fábricas prolatas. La similitud de las fábricas magnéticas observada, independiente de la litología muestreada, y el grado de anisotropía observado en algunos sitios, sugieren que esta se trataría de una fábrica tectónica sobreimpuesta a la fábrica magnética original. En el caso de las fábricas oblatas esta se habría originado sincrónica al emplazamiento de los intrusivos, mientras que la fábrica prolata habría sido adquirida posterior al emplazamiento de los intrusivos como producto de una tectónica de rumbo localizada.

Palabras Clave: ASM, Patagonia, Liquiñe-Ofqui.



1. Introducción

El área de estudio se ubica en el Fiordo Reñihué (c. $42^{\circ}30'S$, Fig. 1). Las rocas en el área corresponden a una asociación de metasedimentos con estructuras preservadas, esquistos verdes, anfibolitas y metabasaltos almohadillados de edad Devónica (Fortey *et al.*, 1992; Hervé *et al.*, 2018), estos últimos interpretados como los remanentes del terreno oceánico Chaitenia (Hervé *et al.* 2016). La geoquímica en roca total indica una signatura toleítica para estos cuerpos máficos, los cuales se presentan metamorfoseados a facies de esquistos verdes (Sanhueza, 1996).

Las unidades paleozoicas y cenozoicas se encuentran intruidas por rocas plutónicas con firmas calco-alcalinas del Batolito Norpatagónico (BNP) (Pankhurst *et al.*, 1992), exhibiendo edades mesozoicas y neógenas al este y oeste de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), respectivamente. La ZFLO corresponde a una estructura transcurrente de orientación NNE, la cual se extiende a lo largo del sistema andino entre los $38^{\circ}S$ y los $47^{\circ}S$ (Hervé, 1976). Aún es ambigua la antigüedad de esta estructura (e.g., Cembrano *et al.*, 2000; Hervé *et al.*, 2017), movimientos transpresivos focalizados a lo largo de esta estructura han acomodado la deformación desde el Cenozoico tardío, generando rotaciones horarias y antihorarias al este y oeste de su traza principal (Cembrano *et al.*, 1992; Rojas *et al.*, 1994). Esta estructura deforma de manera heterogénea a rocas plutónicas y metamórficas del área, generando leves rasgos de milonitización (Rojas *et al.*, 1994; Cembrano *et al.*, 2000).

En la presente contribución se muestran resultados preliminares de los estudios de ASM obtenidos de 18 sitios paleomagnéticos recolectados en las rocas alrededor del Fiordo Reñihue.

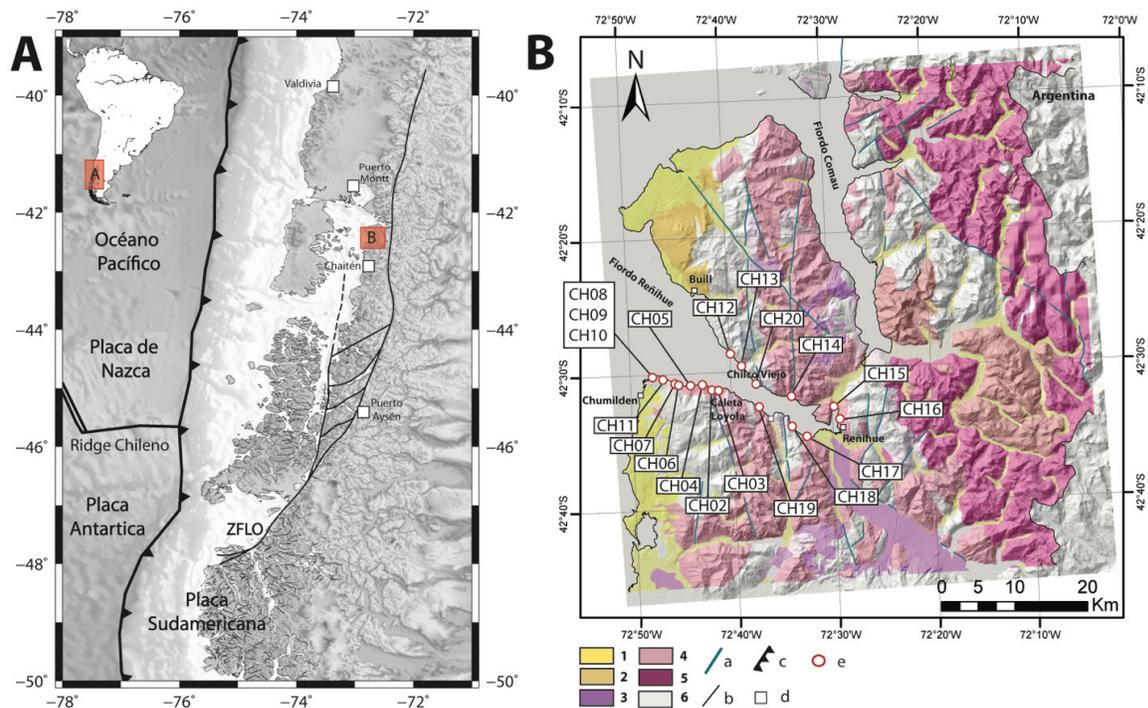


Figura 1. A. Mapa simplificado de las estructuras de carácter regional de Sudamérica al sur de los $40^{\circ}S$. B. Imagen simplificada de la geología del área de estudio. 1. Depósitos no consolidados. 2 Formación Ayacaca. 3. Depósitos de Avalancha volcánica. 4. Unidades meso-cenozoicas del BNP. 5. Unidades mesozoicas del BNP. 6. Rocas Metamórficas. a. principales estructuras y lineamientos del área. b. falla de regional (ZFLO). c. Margen de subducción. d. Localidades. e. Sitios de muestreo



2. Metodología y muestreo paleomagnético

Las muestras para los análisis de ASM fueron tomadas durante la campaña de marzo del 2019, como parte del proyecto Fondecyt N° 1180457. Durante esta campaña se obtuvieron 18 sitios (165 muestras) a lo largo del Fiordo Reñihué (Fig. 1). Los sitios fueron muestreados usando una perforadora portátil y los testigos fueron orientados con un compás magnético o solar cuando fue posible. Cuando la orientación solar no fue posible obtener, la orientación magnética fue corregida usando la declinación calculada por el “International Geomagnetic Reference Field” (IGRF).

Los análisis de laboratorio fueron realizados en el laboratorio de paleomagnetismo de la Universidad de Rennes 1. La magnetización remanente natural (NRM) fue medida usando el magnetómetro de rotación JR6 mientras que la ASM se midió usando el kappabridge de rotación KLY3 AGICO. Los parámetros de ASM se obtuvieron siguiendo los procedimientos estadísticos de Jelínek (1978).

3. Rocas Metamórficas

Las rocas del área corresponden a rocas metavolcánicas del Devónico (Hervé *et al.*, 2018). Estas corresponden a niveles de metasedimentos y metabasaltos. Los niveles de metapsamita en la costa sur del fiordo se observan con capas de 10cm de espesor (CH09) que se intercalan con niveles de metabasaltos almohadillados sin evidencia clara de inversión de polaridad. Sobre estos yace un nivel fino de metapelitas y subyace a él un nivel de metapsamita compacta. Sobre este se deposita otro nivel de metabasalto almohadillado con una leve gradación normal de las estructuras almohadillada. Otro de los sectores donde aparecen niveles de metarenisca es a metros del sitio CH07. Estos se encuentran en contacto con los metabasaltos, pero con una meteorización producto de la acción costera. Los metabasaltos en general exhiben estructuras de cizalla inter “pillow”, alojadas en metapelitas, las cuales presentan en promedio foliación de $330^{\circ}/48^{\circ}$ W.

Los metabasaltos almohadillados se asocian a estructuras volcánicas subacuáticas que corresponden a parte del material volcánico de un antiguo complejo volcánico submarino. Estas rocas se dilucidan como parte de un terreno acrecionado durante el Devónico, Chaitenia. Este terreno se interpreta como un arco de isla oceánica acrecionado al margen de Patagonia (Hervé *et al.*, 2013, 2016, 2018). Aun es desconocida la extensión de Chaitenia y trabajos como este aportan a los entendimientos de su longitud, estructuras y deformación. Se extrajeron 11 sitios paleomagnéticos de rocas metavolcánicas y 1 sitio en metasedimentos (CH09) el cual subyace a niveles de metabasaltos almohadillados.

4. Rocas Intrusivas

Las rocas intrusivas corresponden principalmente a granitoides pertenecientes al BNP (Pankhurst *et al.*, 1992). Las rocas son de composición tonalítica, con texturas faneríticas en general, leucocrática y con fenocristales de hornblenda y de mica biotita (CH03). Estas rocas presentan una tendencia de las fracturas con dirección NNE. Se obtuvieron 5 sitios paleomagnéticos de rocas intrusivas, correspondientes a tonalitas, las que intruyen a las rocas metavolcánicas y metasedimentarias que afloran en las costas del Fiordo Reñihue

5. Resultados

Se obtienen fábricas magnéticas bien definidas en 15 de los 18 sitios muestreados (Fig. 2a). Los sitios CH15, CH17 y CH18 presentan elipsoides prolatos, mientras que el resto presentan elipsoides oblatos, con poca variación entre las muestras de un mismo sitio, a excepción del sitio CH03 (Fig. 2b, c, d). El grado de anisotropía es variable con valores entre 1.006 hasta 1.545. Los sitios CH06, CH04 y CH07 no fueron considerados debido a que existía gran dispersión de los resultados intra-sitio (CH04-CH06) o bien la anisotropía era muy baja (CH07).

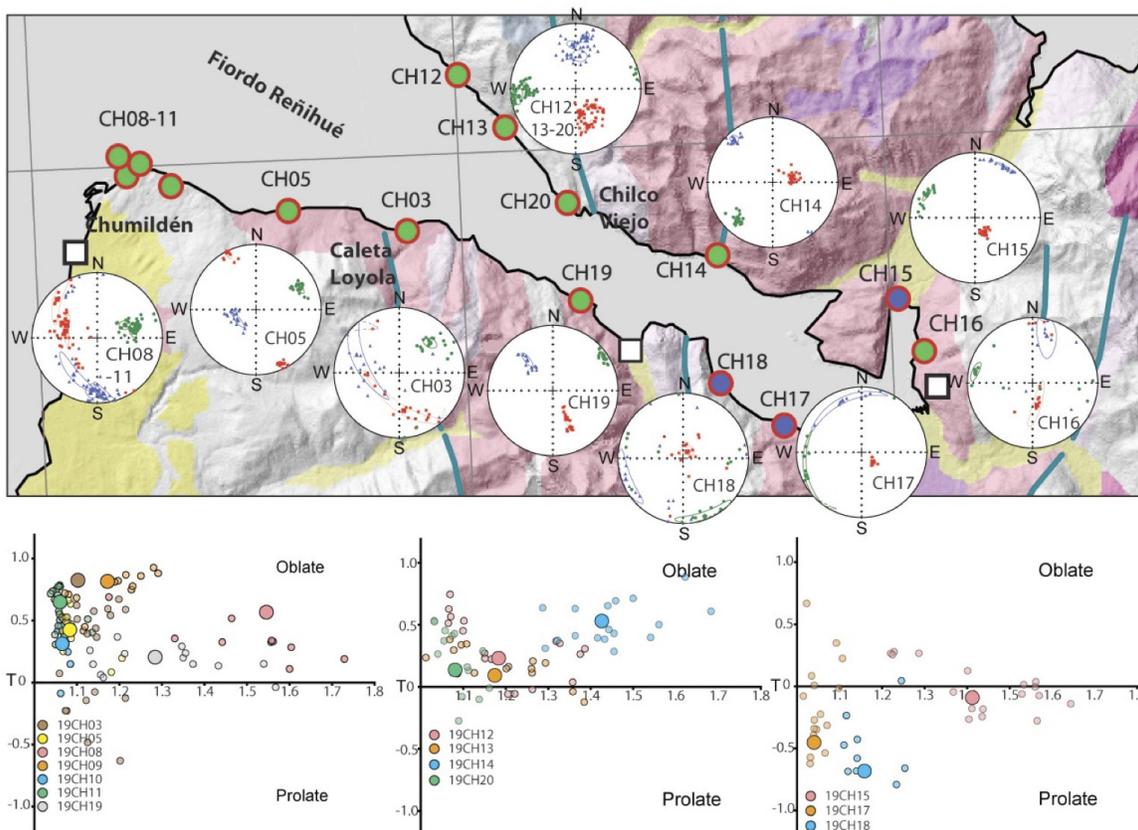


Figura 2. (a) Proyecciones del promedio del tensor de ASM *in situ* por sitios (Jelinek, 1978). Cuadrados (color rojo), triángulos (color azul) y círculos (color verde) representan las lineaciones de la ASM, las direcciones intermedias y el polo de la foliación de la ASM respectivamente. (b, c, d) Diagramas T-P' mostrando la forma de los elipsoides de la AMS.

Los sitios en el sector Loyola-Chumildén (Fig. 1b, Fig. 2a) muestreados en una tonalita (CH03), y en una intercalación de basaltos y sedimentos foliados (CH08-09-10-11), presentan elipsoides oblatos con las direcciones del eje mínimo (K_{min}) bien agrupadas, y que en coordenadas *in-situ* tiene un promedio de declinación e inclinación de 64.3° y 43.4° respectivamente (Fig. 2a). El K_{min} presenta direcciones subhorizontales después de la corrección de manto (subparalelo a la foliación observada). El sitio CH19, ubicado 10 km al este de Caleta Loyola, también presenta un elipsoide oblatos, con una declinación del K_{min} similar (dec: 55.6°) pero una inclinación subhorizontal (inc: 6.7°) (Fig. 2a). El sitio CH02, sin embargo, presenta el polo de la foliación rotado con respecto a los sitios anteriormente descritos con una declinación e inclinación de 205° y 19° respectivamente.

Los sitios ubicados en el sector de Chilco Viejo (Fig. 1b, Fig. 2a) muestreados en metabasaltos almohadillados y una metandesita (CH12-13; CH20) también presentan elipsoides oblatos, y direcciones del K_{min} bien agrupadas (Fig. 2a), y que en coordenadas *in-situ* tiene un promedio de declinación e inclinación de 267° y 15° respectivamente. En los sitios CH12 y CH13, el polo de la foliación magnética presenta una dirección subvertical después de la corrección de manto. El sitio CH14, correspondiente a una tonalita ubicada a 3 km al este del sitio 20 también presenta un elipsoide oblatos, pero con un promedio de declinación e inclinación de 223° y 22° (Fig. 2a).

Solo los sitios CH15, CH17 y CH18 presentan una forma prolata del elipsoide (Fig. 2d). Estos sitios se ubican en el extremo este del fiordo Reñihue y corresponde a una tonalita (CH15 y CH17) y una metabasita



(CH18). Todos ellos presentan una lineación magnética, determinada por el eje K_{\max} , subhorizontal. El sitio CH16, muestreado en una tonalita inmediatamente al este del sitio 15, vuelve a presentar una foliación oblata, con una dirección del eje K_{\min} similar a los sitios CH12-13-20 (Fig. 2a).

6. Discusiones y conclusiones

La similitud de las fábricas magnéticas observada en los sitios de las localidades de Loyola-Chumildén y Chilco Viejo, independiente de la litología, sugieren que esta se trataría de una fábrica tectónica sobrepuesta a la fábrica magnética original. El alto grado de anisotropía de algunos sitios (mayor a 1.2) y el carácter oblato de las fábricas magnéticas también sugieren un origen tectónico para la fábrica magnética observada en el sector oeste del Fiordo Reñihué. Un hecho similar ocurre con las fábricas prolatas observadas en los sitios CH17, CH18 y CH15, en donde la similitud de la dirección del eje K_{\max} independiente de la litología observada y la intensidad de la anisotropía superior a 1.1 en los sitios CH18 y CH15 también apoyarían una fábrica magnética de origen tectónico.

Tanto en los sectores de Chilco Viejo-Buil y Loyola-Chumildén (Fig. 2), la similitud de las fábricas magnéticas de los sitios CH03 y CH14 (intrusivos) y las rocas metabasálticas sugieren que esta fue adquirida durante el emplazamiento de los intrusivos. El hecho que los polos de la foliación sean antipodales en ambos sectores sugieren un evento tectónico compresivo posterior que habría plegado las rocas. Al igual que en el caso anterior, la similitud de las fábricas obtenidas entre el sitio CH15 (intrusivo) y los sitios CH17 y CH18 (metabasálticas) sugieren que esta habría sido adquirida durante/posterior al emplazamiento de los intrusivos. Dada la diferencia entre estos sitios y los muestreados al oeste del fiordo, sugerimos que en este caso la fábrica magnética habría sido adquirida posterior al emplazamiento de los intrusivos y asociado a una tectónica de rumbo localizada.

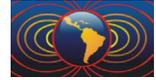
Los datos presentados permiten dividir el fiordo Reñihué en 2 sectores: (1) El sector oeste, caracterizados por fábricas magnéticas oblatas, formadas durante un evento tectónico compresivo concomitante al emplazamiento de los intrusivos (sitios CH03 y CH14), (2) el sector central, caracterizado por fábricas prolatas, formadas posterior al emplazamiento de los intrusivos (sitio CH15) y producto de una tectónica de rumbo localizada posiblemente asociada a la falla Liquiñe-Ofqui. Estos resultados, si bien son preliminares, permiten constreñir de mejor forma la evolución tectónica del sector.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por el proyecto Fondecyt N°1180457(F.H). Agradecemos de forma particular a Doña María y Don Guillermo Méndez, por su hospitalidad y apoyo brindados en Chumildén y a Phillippe Coul por su colaboración.

Referencias

- Cembrano, J., Beck Jr, M. E., Burmester, R. F., Rojas, C., Garcia, A., & Hervé, F. 1992. Paleomagnetism of Lower Cretaceous rocks from east of the Liquiñe-Ofqui fault zone, southern Chile: evidence of small in-situ clockwise rotations. *Earth and Planetary Science Letters*, 113 (4), 539-551.
- Cembrano, J., Schermer, E., Lavenue, A., & Sanhueza, A. 2000. Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the Liquiñe-Ofqui fault zone, southern Chilean Andes. *Tectonophysics*, 319 (2), 129-149.
- Fortey, R., Pankhurst, R.J., Hervé, F. 1992. Devonian trilobites at Buil, Southern Chile. *Revista Geológica de Chile* 19 (2), 133-144. doi:10.5027/andgeo 19, 2-a01
- Hervé, F., Calderón, M., Fanning, M., Pankhurst, R., Rapela, C., Quezada, P. 2018, The country rocks of Devonian magmatism in the North Patagonian Massif and Chaitenia. *Andean Geology* 45 (3):301-317.



- Hervé, F., Fuentes, F., Calderón, M., Fanning, C.M., Quezada, P., Pankhurst, R.J., Rapela, C.W. 2017. Ultramafic rocks in the North Patagonian Andes: is their emplacement associated with the Neogene tectonics of the Liquiñe-Ofqui Fault Zone? *Andean Geology* 44 (1): 1-16. doi:10527/andeangeov44n1-a01.
- Hervé, M. 1976. Estudio geológico de la falla Liquiñe Reloncavi en el área de Liquiñe: antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia). *Actas Congr. Geol. Chil* 1, B39-B56.
- Jelínek, V., 1978. Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Stud. Geophys. Geod.* 22, 50-62, doi:10.1007/BF01613632.
- Pankhurst, R. J., Hervé, F., Rojas, L., & Cembrano, J. 1992. Magmatism and tectonics in continental Chiloé, Chile (42–42 30' S). *Tectonophysics*, 205 (1-3), 283-294.
- Rojas, C., Beck Jr, M. E., Burmester, R. F., Cembrano, J., & Hervé, F. 1994. Paleomagnetism of the mid-Tertiary Ayacara Formation, southern Chile: Counterclockwise rotation in a dextral shear zone. *Journal of South American Earth Science* 7 (1), 45-56.
- Sanhueza, A. 1996. El Complejo Acrecionario y la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui en los fiordos Reñihué y Comau (42°-43°S), Chiloé Continental. Memoria de Título de Geólogo y Grado de Magíster en Geología (Unpublished), Universidad de Chile, Departamento de Geología:93 p.