



RESULTADOS PRELIMINARES DE ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA E MINERALOGÍA MAGNÉTICA DO COMPLEXO VULCÂNICO CAVIAHUE-COPAHUE (ARGENTINA)

Thiago R. Moncinhatto^{1,*}, Maurício B. Haag⁵, Gelvam A. Hartmann², Jairo F. Savian⁵, Wilbor Poletti¹,
Carlos A. Sommer⁵, Alberto T. Caselli^{3,4}, Ricardo I.F. Trindade¹

¹ Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas,
Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil

² Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

⁴ Laboratorio de Estudio y Seguimiento de Volcanes Activos (LESVA),
Universidad Nacional de Río Negro, Roca, Argentina

⁵ Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS),
Porto Alegre, RS, Brasil

*e-mail: thiago.moncinhatto@usp.br

ABSTRACT

The petrofabric of igneous rocks is important to explore the flow dynamics of materials that formed them. In volcanic and pyroclastic rocks, the petrofabric reflects the directions in which lavas and pyroclasts flowed. Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) is a technique widely used to characterize the petrofabric of igneous rocks. However, recent studies show that this technique must be supported by a detailed mineralogical characterization to reduce the ambiguity in the interpretation. In this work, we present preliminary results of AMS and magnetic mineralogy in volcanic and pyroclastic rocks (ignimbrites) from Caviahue-Copahue Volcanic Complex (CCVC, Argentina). Results indicate that magnetic mineralogy strongly affects the AMS results in volcanic rocks and associated ignimbrites, providing “scattered” fabrics when late, Ti-rich titanomagnetite phases dominate the fabric; “inverse” or “intermediate” fabrics when single-domain grains are present, and “normal” fabrics when early crystalized pure magnetite is present.

Keywords: Caviahue-Copahue, magnetic mineralogy, Anisotropy of Magnetic Susceptibility.

RESUMO

A petrofábrica de rochas ígneas é importante para explorar a dinâmica de fluxo dos materiais que as formaram. Em rochas vulcânicas e piroclásticas, a petrofábrica reflete as direções em que lavas e piroclastos fluíram. A Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM) é uma técnica amplamente utilizada para caracterizar a petrofábrica de rochas ígneas. No entanto, trabalhos recentes mostram que esta técnica deve ser acompanhada por uma detalhada caracterização mineralógica, para reduzir interpretações ambíguas da petrofábrica. Neste trabalho, nós apresentamos resultados preliminares de ASM e mineralogia magnética em materiais vulcânicos e piroclásticos (ignimbritos) do Complexo Vulcânico Caviahue-Copahue (CVCC, Argentina). Os resultados indicam que a mineralogia magnética pode afetar fortemente os resultados de ASM em rochas vulcânicas e os ignimbritos associados, resultando em fábrica magnética “dispersa” quando fases tardias de titanomagnetita com alto Ti dominam a fábrica, fábrica magnética “inversa ou “intermediária” quando há presença de grãos domínio-simples, e “normal” quando há presença de magnetita pura com rápida cristalização.

Palavras chave: Caviahue-Copahue, mineralogia magnética, Anisotropia de Susceptibilidade Magnética.

1. Introdução

As rochas apresentam uma grande variedade de minerais ferro-, para- e dia-magnéticos que contribuem



conjuntamente para susceptibilidade magnética total (Tarling, Hrouda, 1993) e, conseqüentemente, para a sua anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM). A ASM é representada por um elipsoide de suscetibilidade com três eixos ortogonais $K1 \geq K2 \geq K3$, indicando máxima, intermediária e mínima suscetibilidade, respectivamente. Alguns parâmetros escalares podem ser calculados para inferir a magnitude de anisotropia e a forma desse elipsoide. A susceptibilidade média $K_m = (K1 + K2 + K3) / 3$ é a média aritmética dos três eixos principais. O parâmetro P conhecido como grau de anisotropia é definido como $P = K1 / K3$. A lineação $L = K1 / K2$ e foliação magnética $F = K2 / K3$ definem a excentricidade do elipsoide de suscetibilidade. O parâmetro T, cujo cálculo é dado por $T = 2 \cdot \ln(K2 / K3) / \ln(K1 / K3) - 1$, é utilizado para distinguir entre elipsoides prolatos ($T < 0$), oblatos ($T > 0$) e triaxiais ($T = 0$). A ASM é, portanto, amplamente utilizada para caracterizar a petrofábrica (arranjo dos grãos) de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas (Graham, 1954; MacDonald, Ellwood, 1987; Rochette *et al.*, 1992; Tarling, Hrouda, 1993; Kodama, 1995; Martín-Hernández *et al.*, 2004).

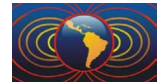
Particularmente, a aplicação da ASM em rochas ígneas extrusivas, quase sempre se refere em determinar direções de fluxo de material vulcânico/piroclástico e as condições topográficas de deposição desse material (Ellwood 1978, 1982; Cañon-Tapia, Pinkerton 2000; Ort *et al.* 2014; Alva-Valdivia *et al.* 2017). No entanto, estudos recentes (Cañón-Tapia, Mendoza-Borunda, 2014; Magee *et al.* 2016) propõem que os parâmetros adquiridos da técnica de ASM são extremamente sensíveis a variações na mineralogia magnética, o que implica fortemente na determinação e interpretação da direção de fluxo desses materiais.

No Complexo Vulcânico Caviahue-Copahue (CVCC) ocorrem seqüências de lavas andesíticas e ignimbritos (soldados e não-soldados) formadas durante os últimos 5 Ma. As diferenças em composição, regime de fluxo, modo de deposição e tempo de resfriamento dessas litologias tornam o CVCC um excelente alvo para comparações entre mineralogia e parâmetros adquiridos pela ASM. Neste trabalho são apresentados resultados preliminares mineralogia magnética e ASM em amostras do CVCC e são discutidas as ambigüidades que a variação desta mineralogia pode causar na técnica de ASM.

2. Contexto geológico e amostragem

O CVCC localiza-se na Zona Vulcânica Sul (ZVS) dos Andes, ao longo do limite Chile-Argentina e da transição Patagônia-Andes Central (Fig. 1). Ele inclui todos os depósitos vulcânicos do Plioceno-Holoceno associados à formação da Caldeira Caviahue e à construção do Vulcão Copahue. O embasamento da caldeira é composto por fluxos de lavas da Formação Cola de Zorro. Esses fluxos datam do início do Plioceno (5.67 ± 0.14 a 4.00 ± 0.10 Ma) de acordo com idades K-Ar (Munõz, Stern 1988; Linares *et al.* 1999). Internamente à caldeira ocorrem três litofácies que compõem lavas e piroclastos da Formação Las Mellizas de idades K-Ar que variam de 2.68 ± 0.14 Ma a 2.60 ± 0.10 Ma (Linares *et al.*, 1999). A primeira litofácia, Lavas Inferiores, ocorre irregularmente no interior da caldeira e está em contato com as lavas da Formação Cola de Zorro. A segunda litofácia é formada por ignimbritos com alto grau de soldagem que ocorrem principalmente à Nordeste e Sudeste da caldeira. A terceira litofácia, Lavas Superiores, ocorre na maior parte da caldeira e forma o embasamento de construção do vulcão Copahue. A atividade vulcânica recente interna à caldeira é restrita a seqüência vulcânica do Copahue, que forma um estratovulcão de 3025 m de altura (Melnick *et al.*, 2006). Por fim, uma pequena cobertura de depósitos piroclásticos (ignimbritos não-soldados) da Formação Riscos Bayos ocorre fora da caldeira (principalmente à Sudoeste desta) sendo interpretada como concomitante ao seu colapso. A idade para esta formação é bem menos conhecida, variando de 2.05 ± 0.10 Ma (Linares *et al.* 1999) até 1.1 ± 0.5 Ma (Muñoz, Stern 1988).

As análises de mineralogia magnética e ASM foram determinadas em 194 amostras de 31 sítios do CVCC. Amostras orientadas usando bússola magnética e solar foram coletadas em campo usando perfuratriz portátil



com broca diamantada. A Figura 1 mostra a localização dos sítios #1-5 e #20 coletados da Formação Cola de Zorro; sítios #23-27 e #29-31 correspondem a ignimbritos não-soldados da Formação Riscos Bayos (Fig. 1); por fim, da Formação Las Melizas, foram coletados os sítios #6, 19, 28 e 33 (Lavas Inferiores), #7-8, 11-14, 22 e 32 (ignimbritos soldados) e #9-10, 16-17 19 e 21 (Lavas Superiores, Fig. 1). Em laboratório, as amostras foram cuidadosamente cortadas em espécimes de 2.5 cm de diâmetro e ~2.2 cm de altura para as medidas de ASM, totalizando 456 espécimes. De cada sítio foram separadas amostras para as análises de mineralogia magnética.

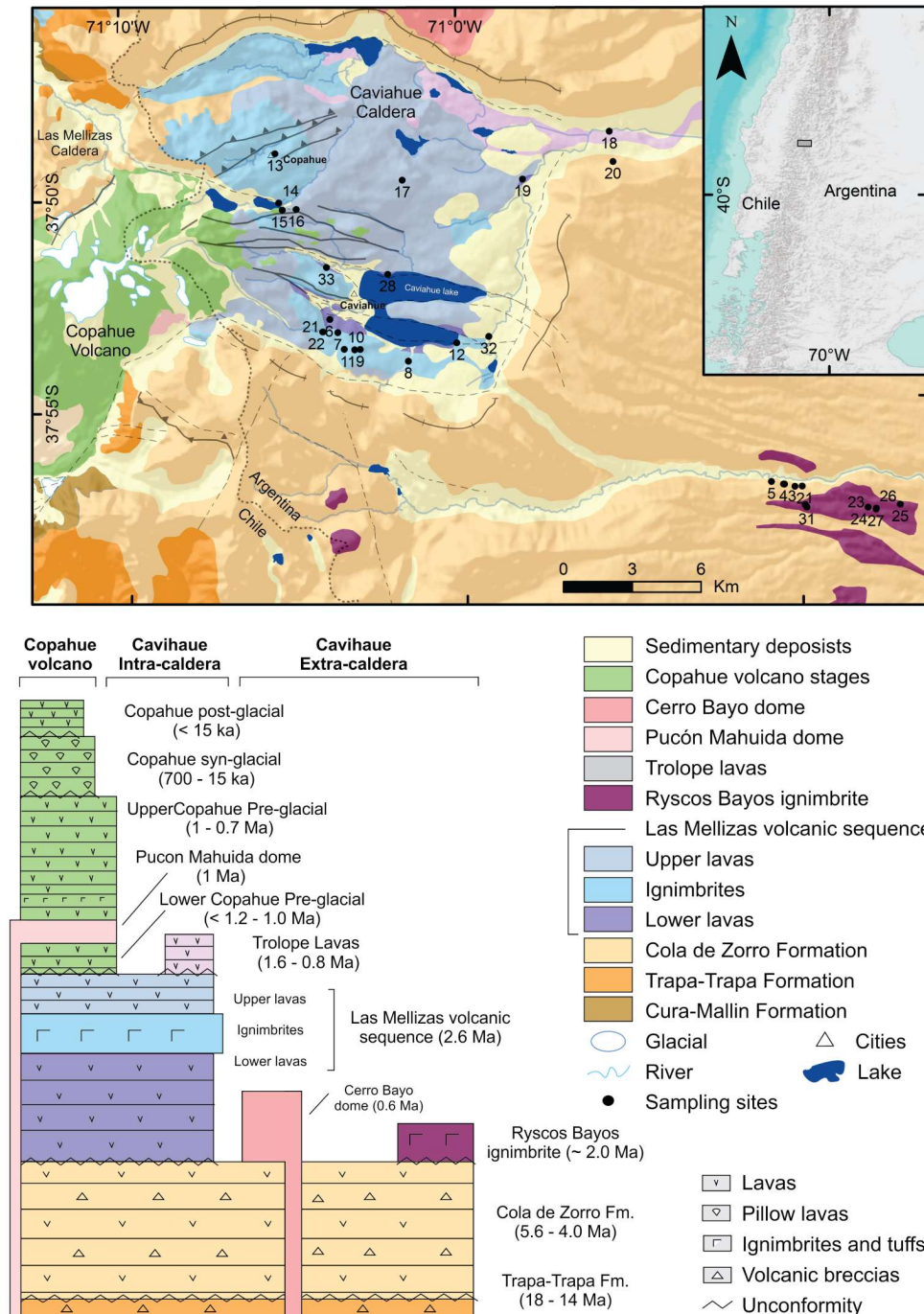


Figura 1. Mapa geológico mostrando os 31 sítios amostrados do Complexo Vulcânico Cavihau-Copahue. Modificado de Melnick et al. (2006).



Métodos

Caracterização da mineralogia magnética

A mineralogia magnética de cada sítio foi determinada através de curvas termomagnéticas, curvas de magnetização remanente isotérmica (MRI) e curvas de reversão de primeira ordem (FORC). Curvas termomagnéticas foram determinadas em ciclos de aquecimento e resfriamento da temperatura ambiente até 600 °C utilizando um susceptibilímetro Kappabridge KLY4 (Agico Ltd). Curvas de MRI foram adquiridas em passos crescentes aplicando campos magnéticos de até 1 Tesla, utilizando um magnetômetro de amostras vibrante (VSM) MicroMag 3900 (Princeton Measurements Corp.). Por fim, diagramas FORC foram determinados a partir da aquisição de curvas parciais aplicando-se campos magnéticos de até 300 mT e utilizando o mesmo equipamento usado nas curvas de MRI.

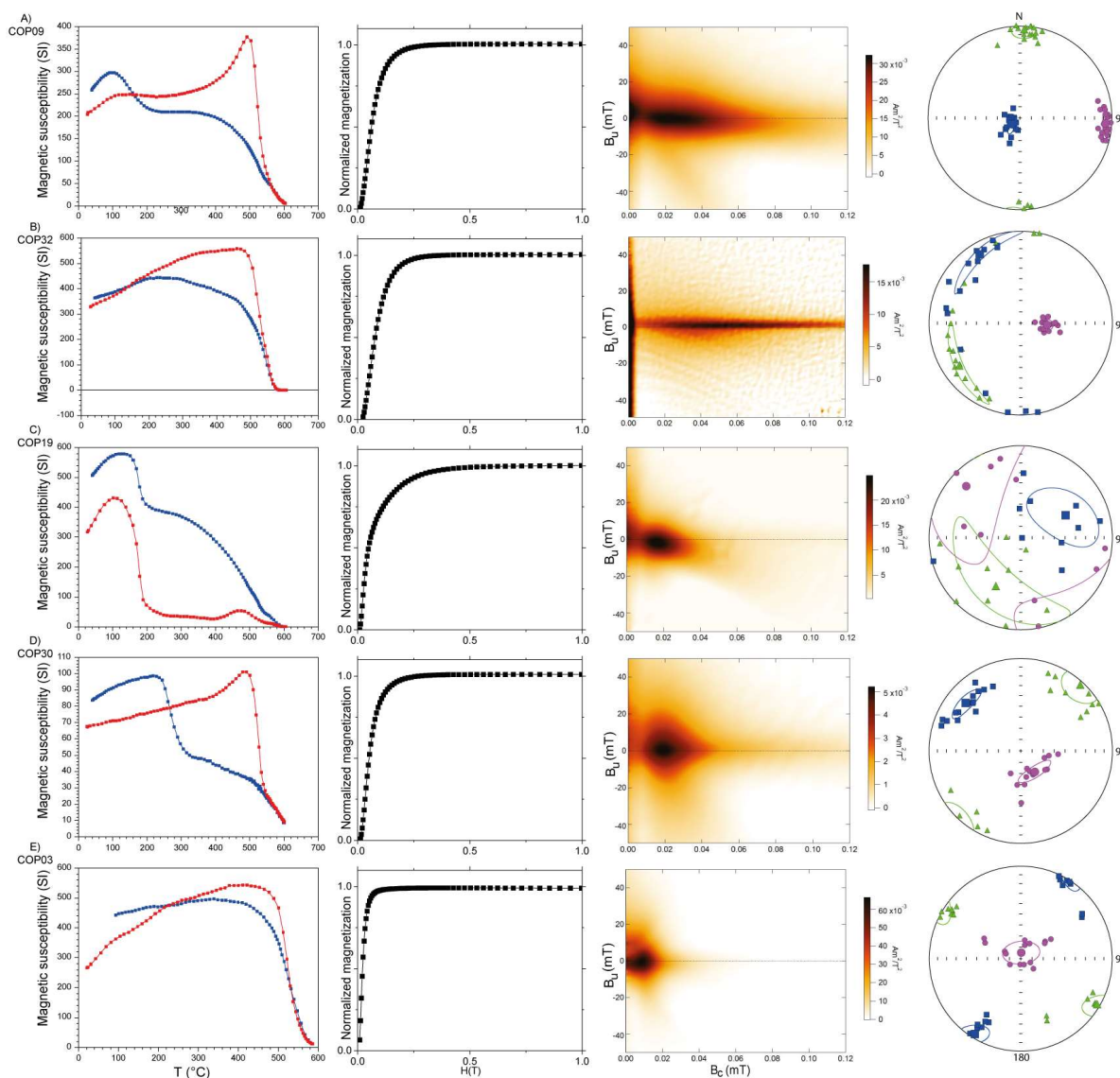


Figura 2. Curvas termomagnéticas, curvas de magnetização remanente isotermal, diagramas FORC, estereogramas de ASM. A) Fm. Las Mellizas - Lavas Superiores. B) Fm. Las Mellizas - Ignimbritos. C) Fm. Las Mellizas - Lavas Inferiores. D) Fm. Riscos Bayos. E) Fm. Cola de Zorro.



Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM)

Medidas de ASM foram adquiridas para todas as amostras utilizando um Kappabridge MFK1-A (Agico Ltd.) com campo de 300 A/m e frequência de 976 Hz. A fábrica magnética das rochas vulcânicas foi definida aqui como normal, intermediária e inversa, de acordo com a orientação dos eixos de susceptibilidade da ASM em relação ao plano de acamamento. Dessa forma, uma fábrica “normal” ocorre quando o plano de foliação (plano $K1-K2$) é subparalelo ao plano de acamamento. Uma fábrica “intermediária” ocorre quando o plano $K1-K3$ é subparalelo ao plano de acamamento. Por fim, uma fábrica “inversa” ocorre quando o plano $K2-K3$ é subparalelo ao plano de acamamento. Já em rochas piroclásticas a fábrica magnética é melhor definida em termos da dispersão do eixo $K1$ (lineação) dentro do plano de foliação (plano $K1-K2$) (Agrò *et al.*, 2014). O plano de foliação é comumente imbricado com relação ao plano de acamamento. Dessa forma, a lineação magnética pode ser paralela ($\theta < 35^\circ$), oblíqua ($35^\circ < \theta < 55^\circ$) ou transversal ($\theta > 55^\circ$) à direção de imbricação.

Resultados e discussão

Os resultados de mineralogia magnética apresentam grande dependência litológica (Fig. 2). Amostras das sequências Lavas Superiores (Fig. 2A) e Ignimbritos (Fig. 2B), ambas da Formação Las Mellizas, apresentam temperaturas de Curie elevadas ($570-585^\circ\text{C}$) típicas de magnetita pura ou titanomagnetita pobre em Ti, bem como curvas de MRI que saturam em campo de $\sim 0.2\text{ T}$. Grande parte dos diagramas FORC para estas sequências tem comportamento tipicamente associado a estrutura de Domínio Simples (SD). Os seus estereogramas denotam tramas de ASM inversa (Fig. 2A) e transversal (Fig. 2B) que são interpretadas como resultantes do efeito causado por grãos SD (Ferré, 2002).

A sequência de Lavas Inferiores da formação Las Mellizas (Fig. 2C) apresenta baixa temperatura de Curie $\sim 200^\circ\text{C}$, característica de titanomagnetita com alto conteúdo de titânio. Curvas de MRI saturam em campo de $\sim 0.3\text{ T}$ e diagramas FORC são típicos de misturas entre Domínio Simples e Multi-Domínio (MD). Imagens de microscopia óptica e eletrônica revelam que estes grãos foram formados em estágios tardios do processo de cristalização, após o alojamento final das lavas. Os estereogramas de ASM para esta sequência apresentam trama magnética pouco definida, provavelmente por conta do caráter tardio dos cristais de titanomagnetita, portadores da magnetização, que portanto não sofreram alinhamento mecânico devido ao fluxo de lava.

Os Ignimbritos não soldados da formação Riscos Bayos (Fig. 2D) apresentam temperaturas de Curie típicas de magnetita pura ou titanomagnetita pobre em Ti e curvas de MRI semelhantes às das sequências de Lavas Superiores e Ignimbritos da formação las Mellizas (Figs. 2A e 2B). No entanto, diagramas FORC para essa formação são típicos de misturas SD-MD como na sequência de Lavas Inferiores. Estereogramas de ASM para estas rochas tem trama magnética do tipo paralela com eixo $K3$ inclinado 70° para sudeste. Do mesmo modo, amostras de rochas vulcânicas da formação Cola de Zorro apresentam alta temperatura de Curie ($\sim 580^\circ\text{C}$); a maior parte das curvas termomagnéticas para esta formação são reversíveis entre os ciclos de aquecimento-resfriamento. Curvas de MRI saturam em campo magnético menor que 0.1 T e diagramas FORC são característicos de comportamento MD. Os estereogramas de ASM apresentam trama normal bem definida, o que é indicativo deste tipo de mineralogia magnética.

Agradecimentos

T.R.M. agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo #144580/2016-0). G.H. agradece à CAPES (processo AUXPE #2043/2014) e CNPq (Processo #454609/2014-0). Os autores agradecem à D. Brandt, G. Moreira e P. Jaqueto pelo suporte prestado durante preparação



de amostras e aquisição dos dados no Laboratório de Paleomagnetismo e Magnetismo de Rochas da USP (USPMag).

Referências

- Agrò, A., Zanella, E., Le Pennec, J., Temel, A., 2014. Magnetic fabric of ignimbrites: a case study from the Central Anatolian Volcanic Province. *Geological Society, London, Special Publications 396*, 159-175.
- Alva-Valdivia, L.M., Agarual, A., Cabalero-Mirando, C., García-Amador, B.I., Morales-Barrera, W., Rodríguez-Elizarráz, S., Rodríguez-Tejo, A., 2017. Paleomagnetic and AMS studies of the El Castillo ignimbrite, central-east Mexico: Source and rock magnetic nature. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 336, 140-154.
- Cañón-Tapia, E., Pinkerton, H., 2000. The anisotropy of magnetic susceptibility of lava flows: an experimental approach. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 98, 219–233.
- Ellwood, B.B., 1978. Flow and emplacement direction determined for selected basaltic bodies using magnetic susceptibility anisotropy measurements. *Earth Planet. Sci. Lett.* 41, 254–264.
- Ellwood, B.B., 1982. Estimation of flow directions for calc-alkaline welded tuffs and paleomagnetic data reliability from anisotropy of magnetic susceptibility measurements. *Earth Planet. Sci. Lett.* 35, 116–122.
- Ferré, E., 2002. Theoretical models of intermediate and inverse AMS fabrics. *Geophys. Res. Lett.* 29, 31-1–31-4.
- Graham, J.W., 1954. Magnetic anisotropy, an unexploited petrofabric element. *Geol. Soc. Am. Bull.* 65, 1257–1258.
- Kodama, K.P., 1995. Magnetic Fabrics. *Rev. Geophys.* 33, 1991–1994.
- Linares, E., Osters, H.A., Mas, L.C., 1999. Cronología potasio-argón del complejo efusivo Copahue-Caviahue, Provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 54, 3, 240–247.
- MacDonald, W.D., Ellwood, B.B., 1987. Anisotropy of magnetic susceptibility: sedimentological, igneous and structural-tectonic applications. *Rev. Geophys.* 25, 905–909.
- Magee, C., O’Driscoll, B., Petronis, M.S., and Stevenson, C.T.E., 2016, Three-dimensional magma flow dynamics within subvolcanic sheet intrusions. *Geosphere* 12, 3, 842–866.
- Martín-Hernández, F., Lüneburg, C.M., Aubourg, C., Jackson, M., Aubourg, C., 2004. Magnetic fabric: methods and applications- an introduction. *Geological Society of London* 238, 1–7.
- Melnick, D., Folguera, A., Ramos, V.A., 2006. Structural control on arc volcanism: The Caviahue–Copahue complex, Central to Patagonian Andes transition (38°S). *Journal of South American Earth Sciences* 22, 66–88.
- Muñoz, J.B., and Stern, C.R., 1988. The Quaternary volcanic belt of the Southern continental margin of South America: Transverse structural and petrochemical variations across the segment between 38S and 39S. *Journal of South American Earth Sciences* 1, 2, 147–161.
- Ort, M.H., Newkirk, T.T., Vilas J.F., Vazquez, J.A., 2014. Towards the definition of AMS facies in the deposits of pyroclastic density currents. *Geological Society, London, Special Publications 396*, 205–226.
- Rochette, P., Jackson, M., Aubourg, C., 1992. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Rev. Geophys.* 30, 209–226.