



## ESTUDIO DE FÁBRICA MAGNÉTICA EN MODELOS ANÁLOGOS: COMPARACIÓN ENTRE DISTINTAS MINERALOGÍAS

J. M. Calvagno<sup>1,2,\*</sup>, R. N. Tomezzoli<sup>1</sup>, E. O. Cristallini<sup>2</sup>, M. B. Febbo<sup>3</sup>, L. C. Gallo<sup>1</sup>,  
F. Copertini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Laboratorio de Paleomagnetismo D.A. Valencio, Departamento de Geología, FCEyN, Universidad de Buenos Aires, CABA, Argentina.

<sup>2</sup> Instituto de Estudios Andinos (IDEAN), Laboratorio de Modelado Geológico, Departamento de Geología, FCEyN, Universidad de Buenos Aires, CABA, Argentina.

<sup>3</sup> Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina.

\*e-mail: [juanmacalvagno@gmail.com](mailto:juanmacalvagno@gmail.com)

### ABSTRACT

Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) is a precise method to know the magnetic fabric and allows to know the spatial location of regional stresses in deformed areas. The relationship between the ellipsoid of AMS and its coaxiality with the ellipsoid of stress and deformation is known, where the minor axis of AMS ( $K_{\min}$ ) coincides with the direction of the main stress  $\sigma_1$ . From the measurement of magnetic susceptibility and the interpretation of the internal magnetic fabric of analogous sand models, an approximation can be made to the knowledge of the distribution of stress in deformation zones. Here we present the results of three analogues models with different magnetic mineralogies. They were performed with the objective of evaluating the magnetic susceptibility in different positions of the model and calculate the AMS ellipsoid and the relationship between the fabric obtained and the magnetic mineralogy, to compare which of the different mineralogies are the best to subsequent models.

**Keywords:** Anisotropy of magnetic susceptibility, analogue modeling, structural geology

### RESUMEN

La anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS) es un método preciso para conocer la fábrica magnética y permite conocer la ubicación espacial de los esfuerzos regionales en áreas deformadas. La relación entre el elipsoide de AMS y su coaxialidad con el elipsoide de esfuerzos y deformación es conocida, donde el eje menor de AMS ( $K_{\min}$ ) coincide con la dirección del esfuerzo principal  $\sigma_1$ . A partir de la medición de la susceptibilidad magnética y la interpretación de la fábrica magnética interna de modelos análogos de arena, se puede hacer una aproximación sobre la distribución de los esfuerzos en zonas de deformación. Aquí presentamos los resultados de tres modelos análogos con diferentes mineralogías magnéticas. Los modelos se realizaron con el objetivo de evaluar la susceptibilidad magnética en diferentes posiciones del modelo y calcular el elipsoide de AMS y la relación entre la fábrica magnética y la mineralogía magnética, para comparar cuáles de las diferentes mineralogías son las mejores para los modelos posteriores.

**Keywords:** Anisotropía de susceptibilidad magnética, modelos análogos, geología estructural

### 1. Introducción

La Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) es un método preciso para conocer la fábrica interna de las rocas y permite conocer la ubicación espacial de los esfuerzos regionales en zonas deformadas. Es conocida la relación existente entre el elipsoide de ASM y su coaxialidad con los elipsoides de esfuerzos y deformación, donde el eje menor de ASM ( $K_{\min}$ ) coincide con la dirección del esfuerzo principal  $\sigma_1$  (Rochette *et al.*, 1992; Tarling and Hrouda, 1993). A partir de la medición de la susceptibilidad magnética y de la interpretación de la fábrica magnética interna de modelos análogos realizados con arena se puede

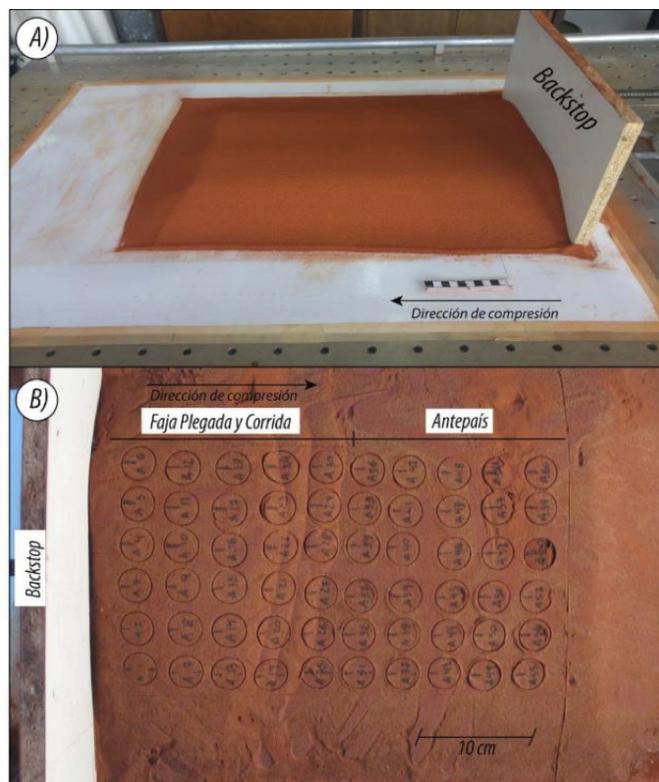


realizar una aproximación al conocimiento de la distribución de esfuerzos actuantes en zonas de deformación (Almqvist y Koyi, 2018).

Aquí se presentan los resultados de tres modelados análogos dónde se utilizaron distintas mineralogías magnéticas. Los mismos fueron realizados con el objetivo de evaluar la susceptibilidad magnética en distintas posiciones del modelo y calcular de esta forma el elipsoide de ASM y la relación existente entre la fábrica obtenida con la mineralogía magnética utilizada. De esta forma se busca comparar y determinar cuál de las mineralogías magnéticas utilizadas es la más adecuada para realizar estudios posteriores de fábrica magnética en modelos análogos. En todos los prototipos se modeló una fábrica sedimentaria obtenida a partir de una sedimentación homogénea que luego fue deformada para desarrollar una Faja Plegada y Corrida (FPyC).

## 2. Metodología

Se realizaron tres modelos análogos en el Laboratorio de Modelado Geológico (LaMoGe) de la Universidad de Buenos Aires. Para los mismos se utilizó de base una mezcla de arena cuarzosa a la que se le agregó óxido de hierro (Modelo A), muscovita (Modelo B) y arcilla de uso artístico (Modelo C) para los respectivos modelos (Fig. 1).



**Figura 1.** Esquema de los modelos realizados. La escala de referencia es de 10 cm. A) Plataforma sin deformación. La sedimentación se realizó sobre una lámina de acetato acoplada al backstop, generando una discontinuidad que permite el desarrollo de una FPyC. B) Modelo final (vista en planta). Las muestras para ASM fueron tomadas utilizando una broca con punta de diamante. El tamaño final de las muestras es el tamaño estándar utilizado en estudios paleomagnéticos (diámetro de 2.54 cm y altura de 2.2 cm).

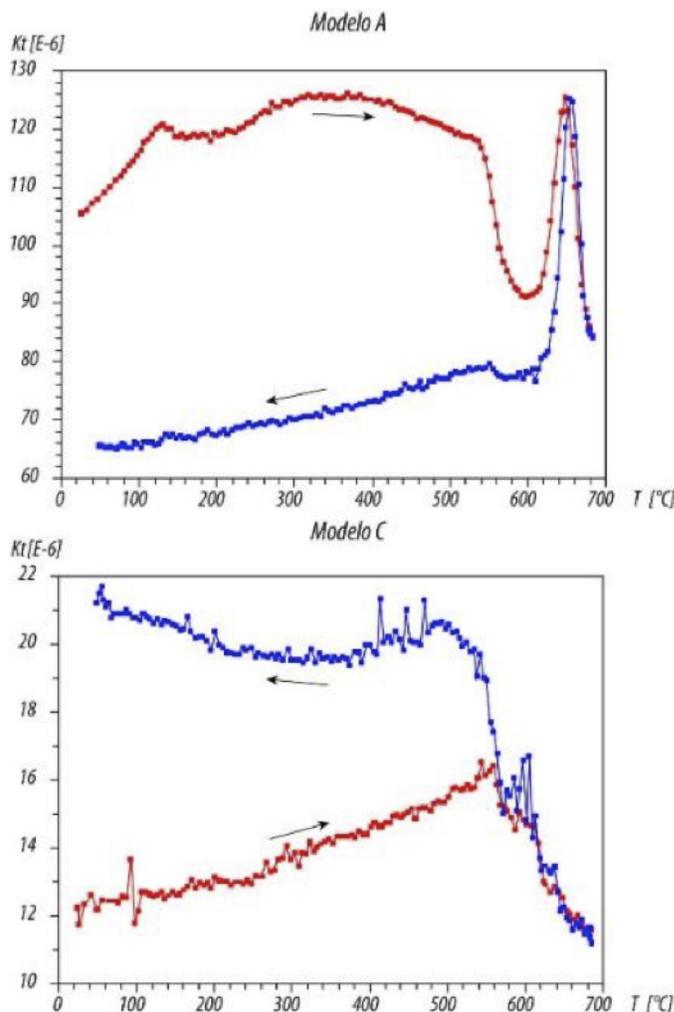
La configuración inicial utilizada para los tres modelos fue similar. Se fabricó una torta homogénea de arena sin confinamiento (para no generar condiciones de borde) con un espesor de 3 cm de altura sobre una lámina de acetato de 30 cm de ancho y 10 de largo. Esto último se hizo con el fin de formar una discontinuidad en el modelo que genere fallas y plegamientos producto de la compresión y que a su vez éstos estuvieran alejados del backstop (Fig. 1b). La dimensión del modelo inicial fue de 60 cm de largo por 40 cm de ancho y 3 cm de espesor (Fig. 1a). Al no utilizar una caja confinante, se utilizó la parte central



del modelo, es decir la parte no afectada por los bordes del mismo. De esta forma, las dimensiones del área de muestreo efectiva fueron de 50 cm de largo por 20 cm de ancho, con un espesor final en la faja plegada y corrida de 6 cm y de 3 cm en el antepaís (Fig. 1b). Con el fin de obtener una sedimentación homogénea se utilizó un sedimentador para dejar caer el material de manera uniforme a lo largo de todo el modelo. El sedimentador se encontraba a una altura de 50 cm por encima de la mesa de modelado. Se corrió cada uno de los modelos hasta lograr un acortamiento de 10 cm. Finalizado el modelo, con el objetivo de endurecerlo y/o solidificarlo se fue humedeciendo en momentos sucesivos con gelatina líquida, permitiendo que el líquido percole en los intersticios del material para posteriormente tomar las muestras. Se tomaron un total de 175 especímenes que fueron medidos en un susceptibilímetro MFK-1A Kappabridge (AGICO) en el Laboratorio de Paleomagnetismo “Daniel A. Valencio” perteneciente al Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Se separaron 2 zonas de muestreo de los modelos (Fig. 1b). La zona deformada, más cercana al pistón, representando a la FPyC y la zona más alejada del mismo, representando al antepaís.

### 3. Mineralogía magnética

Para caracterizar la mineralogía y el comportamiento magnético de los materiales, se realizaron curvas de susceptibilidad magnética en función de la temperatura en los Modelos A y C (óxido de hierro y arcilla respectivamente; Fig. 2). Las mismas se realizaron con un susceptibilímetro Kappabridge MFK1-FA



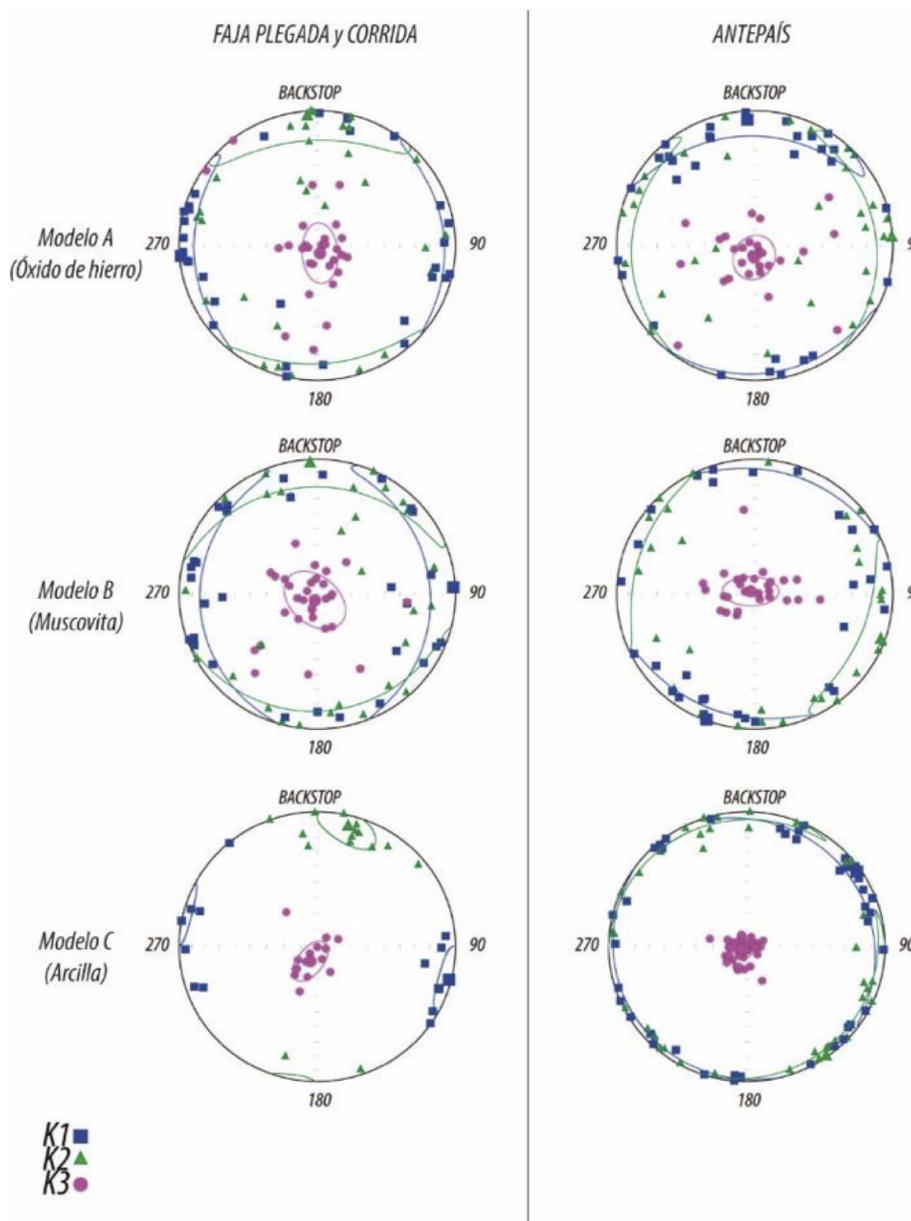
**Figura 2.** curvas de susceptibilidad vs temperatura realizadas en los modelos A y C (Rojo: calentamiento; Azul: enfriamiento). En ambas curvas se observa un comportamiento irreversible de las mismas, indicando la formación de nuevos minerales. En el modelo A se observa un pico Hopkinson a los 680° C, que indica la presencia de hematita. En el modelo C se observa un pico Hopkinson cercano a los 580° C y una caída de la susceptibilidad, indicando la presencia de magnetita como mineralogía portadora de la magnetización



equipado con un sistema de control de temperatura CS-4 (AGICO). Del Modelo B no se realizó estudio de mineralogía magnética debido a que ya se conocía la mineralogía utilizada (muscovita). En la curva del modelo A se puede observar que la misma es irreversible, indicando la formación de nuevos minerales. La misma tiene una abrupta caída alrededor de los 580° C, producto de presencia de magnetita, y un marcado pico Hopkinson cerca de los 680° C indicando la presencia de hematita. En el modelo C se observa que la curva tiene un comportamiento irreversible, indicando la neoformación de minerales luego del calentamiento, y una abrupta caída cerca de los 580° C, indicando que la magnetita sería la portadora de la magnetización.

#### 4. Resultados

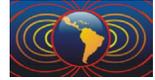
Se analizaron un total de 175 especímenes. Del análisis direccional de los ejes de anisotropía de susceptibilidad magnética se observa que hay una diferencia entre la fábrica desarrollada en la FPyC (cercana al pistón) y la que se encuentra en el antepaís (Fig. 3). En este último se observa que en los tres modelos se dispone



**Figura 3.** Representación de los ejes del elipsoide de anisotropía de susceptibilidad magnética dispuestos en una red de igual área proyectados en el hemisferio Sur.  $K_1$ : eje mayor,  $K_2$ : eje intermedio,  $K_3$ : Eje menor. La compresión se realizó en un sentido N-S (es decir desde el backstop hacia el antepaís).

**Izquierda:** representación de los elipsoides correspondientes a la zona de la Faja Plegada y Corrida de cada uno de los modelos. Se observa que el eje  $K_3$  se encuentra en la vertical, mientras que el eje  $K_1$  tiende a disponerse a 90° del backstop, es decir en dirección E-O, con un sentido de la compresión N-S.

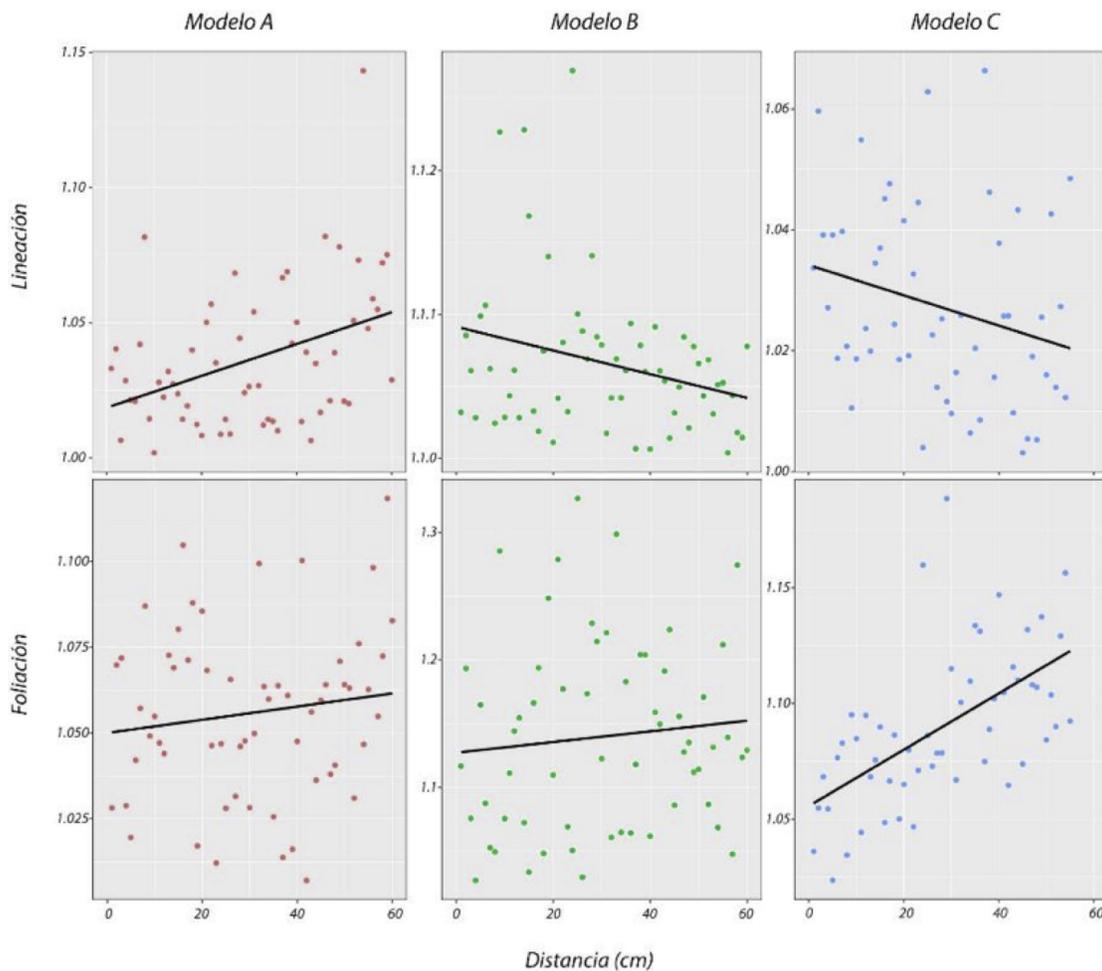
**Derecha:** representación de los ejes de ASM correspondiente a la zona del antepaís. Se observa que el  $K_3$  se mantiene en la vertical mientras que el  $K_1$  y el  $K_2$  se disponen alrededor del mismo contenido en el plano de estratificación.



un elipsoide de tipo oblado, coincidente con una fábrica sedimentaria, con el  $K_{\min}$  en la vertical y el  $K_{\max}$  y  $K_{\text{int}}$  dispuestos en una guirnalda contenidos en el plano de estratificación (Fig. 3). Por otro lado, en la zona de la FPyC se observan elipsoides de tipo triaxiales a oblados. Esto resultaría en una fábrica de tipo sedimentaria deformada, donde el  $K_{\max}$  tiende a disponerse en dirección E-O de manera perpendicular al esfuerzo principal máximo  $\sigma_1$  (acortamiento principal N-S) y el  $K_{\min}$  se mantiene paralelo al polo del plano de estratificación, es decir en la vertical.

La susceptibilidad media del modelo A es de  $1.11 \times 10^{-4}$  SI, del modelo B de  $5.46 \times 10^{-5}$  SI y del modelo C de  $1.33 \times 10^{-4}$  SI. En los modelos A y C la susceptibilidad media es mayor que en el modelo B, siendo el Modelo C el que presenta mayor susceptibilidad magnética.

En todos los modelos se observa que hay un aumento de la foliación ( $K_2/K_3$ ) hacia el antepaís (Fig. 4). A su vez la lineación ( $K_1/K_2$ ) disminuye hacia el antepaís, con excepción del modelo A.



**Figura 4:** lineación/foliación vs distancia al pistón. La foliación tiende a incrementar hacia el antepaís mientras que la lineación tiende a disminuir



## 5. Conclusiones y discusiones

En cada uno de los modelos realizados se observaron diferencias en las fábricas magnéticas resultantes entre sí y a lo largo de los mismos. Se observó que la ASM responde de manera bastante sensible a la deformación o incluso a la sedimentación.

En la zona del antepaís se adquiere una fábrica magnética sedimentaria típica con el  $K_{\min}$  en la vertical y el  $K_{\max}$  y  $K_{\text{int}}$  en el plano horizontal formando una guirnalda. En el sector de la FPyC donde hay mayor deformación, si bien el  $K_{\min}$  permanece en la vertical los ejes  $K_{\max}$  y  $K_{\text{int}}$  rotan para colocarse en la dirección de mayor elongación, esto es perpendicular a la dirección de mayor compresión.

De los tres modelos realizados el modelo B es el que tiene menos susceptibilidad y mayor dispersión en la relación lineación/foiliación. Esto podría deberse a que la muscovita, aunque no contiene cantidades significativas de hierro (comportamiento que se observa en la susceptibilidad), exhibe una gran anisotropía planar y por lo tanto las láminas tienden a disponerse de manera más dispersa y aleatoria, aun cuando son compactadas.

El modelo C es el que tiene mayor susceptibilidad magnética y el que mejor reproduce la fábrica magnética tanto sedimentaria como tectónica, y por lo tanto el más apto para realizar modelados análogos aplicables a situaciones geológicas reales. Esto se podría deber a que la mineralogía magnética de la arcilla más su tamaño de grano pequeño y su plasticidad, permiten acomodarse y absorber fácilmente el esfuerzo actuante. La principal diferencia en los tres modelos realizados radica en la definición de la fábrica magnética, representada por el agrupamiento de los ejes del elipsoide de ASM, siendo el modelo C el que mejor representa esta característica. Es notorio que el modelo realizado con muscovita, a pesar de no contener una mineralogía magnética relevante como los otros dos, reproduce fielmente la fábrica adquirida y la anisotropía planar del propio mineral.

## Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias a la colaboración y el apoyo del Laboratorio de Modelado Geológico de la UBA. Todas las mediciones fueron realizadas en el laboratorio de geofísica “Daniel A. Valencio” de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA.

## Referencias

- Almqvist B.S.G., Koyi H., 2018. Bulk strain in orogenic wedges based on insights from magnetic fabrics in sandbox models. *Geology* 46, 483–486. <https://doi.org/10.1130/G39998.1>
- Rochette P., Jackson M., Aubourg C., 1992. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Rev. Geophys.* 30 (3), 209–226 pp.
- Tarling, D.H., Hrouda F., 1993. The magnetic anisotropy of rocks. Chapman & Hall, 218 pp