



Estudios de fábrica magnética en modelos análogos: comparación entre distintas mineralogías

Juan Martín CALVAGNO^{1,2}; María Belén FEBBO³; Renata Nela TOMEZZOLI^{1,2}; Leandro César GALLO^{1,2}; Ernesto Osvaldo CRISTALLINI^{1,4}

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad de Buenos Aires. Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Buenos Aires.

²Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Buenos Aires.

³Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca.

⁴Laboratorio de Modelado Geológico (La.Mo.Ge.), Instituto de Estudios Andinos (IDEAN), Buenos Aires.

Email: juanmacalvagno@gmail.com, belenefebbo@gmail.com, rtomezzoli@gmail.com, len.gallo@gmail.com, ecristallini@gmail.com.

Editor: José F. Mescua

Recibido: 20 de noviembre de 2020.

Aceptado: 10 de marzo de 2021.

RESUMEN

Los procesos de adquisición de fábrica magnética durante la sedimentación y posterior deformación compresiva continúan siendo ambiguos y al día de hoy debatidos. Con el objetivo de simular estos mecanismos, se realizaron tres modelos análogos con acortamiento inducido artificialmente en cajas de arena y diferentes mineralogías magnéticas. Los minerales empleados pertenecen a las familias de los óxidos de hierro, muscovitas y arcillas. Posteriormente a la deformación de los modelos, se utilizó la técnica de anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) como indicador de petrofábrica para así estudiar el comportamiento de las diferentes mineralogías frente al acortamiento. Se comparó la robustez de los resultados obtenidos a partir de cada uno de los modelos con el fin de determinar qué mineralogía resulta más propicia para realizar estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en modelos análogos. A partir de las mediciones de ASM realizadas, surge que en la zona de mayor compresión se desarrolla una fábrica magnética de tipo sedimentaria deformada, mientras que en la zona de no deformación se conserva una fábrica sedimentaria típica. De los tres tipos de mineralogía utilizados, los minerales de arcilla arrojaron los resultados más concluyentes para el estudio de fábrica magnética en modelos análogos.

Palabras clave: modelado geológico, anisotropía de susceptibilidad mineralogía magnética.

ABSTRACT

Magnetic fabric studies in analogue models: comparison between different mineralogies.

Three analogue models were performed with the aim of reproduce the way of magnetic fabric acquisition during natural processes, in this case sedimentation and subsequent compressive deformation. We utilized iron oxide, muscovite and clay respectively, and then we compared the quality of the results to determinate which mineralogy is the most convenient to realize anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) studies in analogue models. The AMS results shows that a sedimentary-deformed magnetic fabric was developed in the major compression zone, while the not-deformed zone conserves a typical sedimentary magnetic fabric. The clay was the most propitious material to AMS studies in analogue models.

Keywords: geological modelling, anisotropy of magnetic mineralogy susceptibility.

INTRODUCCIÓN

La anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) es un método que permite interpretar los esfuerzos actuantes en los procesos naturales de deformación o depositación de las rocas, a partir del conocimiento de la disposición de su fábrica magnética (Tarling y Hrouda 1993, Parés 2015 y referencias allí citadas). Este método consiste en aplicar un campo magnético de baja intensidad en distintas direcciones sobre una muestra orientada, con el fin de determinar cuál es la deformación que sufre la magnetización inducida. De esta forma se puede elaborar un elipsoide de susceptibilidad magnética, cuyos ejes máximo, intermedio y mínimo son perpendiculares entre sí y corresponden a las direcciones principales de susceptibilidad ($K_{\text{máx}}$, K_{int} y $K_{\text{mín}}$ respectivamente). En rocas sedimentarias, la fábrica magnética resulta afectada por diversos factores entre los que se incluyen: las condiciones de depositación, grado de compactación, tamaño de grano, mineralogía magnética, la superposición de eventos tectónicos, paleocorrientes y condiciones de soterramiento entre otros. En el caso de rocas deformadas, las direcciones principales de susceptibilidad a menudo son coaxiales con las direcciones principales de la deformación, donde el $K_{\text{máx}}$ se corresponde al eje de máxima elongación y el eje $K_{\text{mín}}$ corresponde al eje de mínima elongación (Borradaile 1988). Es por esto que los estudios de ASM en zonas de fajas plegadas y corridas (FPyC) permiten tener una aproximación al conocimiento de la distribución de los esfuerzos actuantes en la deformación (Graham 1966, Borradaile 1991, Parés et al. 1999, Weil y Yonkee 2009, Calvagno et al. 2020) Por otra parte, en las fajas plegadas y corridas (FPyC) el acortamiento se acomoda en tres componentes de deformación principales: acortamiento paralelo a las capas (LPS, por sus siglas en inglés *Layer Parallel Shortening*), plegamiento y fallamiento. De estos factores, los últimos dos son los más fáciles de detectar y mapear en la mesoescala, mientras que el LPS no deja necesariamente rastros fácilmente observables en el campo a pesar de ser un componente importante en el desarrollo de la deformación, principalmente en los estadios iniciales de la misma (Engelder y Geiser 1979, Mitra y Adolph Yonkee 1985, Geiser 1988, Ong et al. 2007, Yonkee y Weil 2010, Eichelberger y McQuarrie 2014). Sin embargo, el mismo puede ser bien reconocido en los modelos análogos, ya que se conocen las condiciones previas a la deformación. Por esta razón, los estudios de fábrica magnética en modelos análogos pueden ser utilizados para comprender la relación entre las propiedades magnéticas de las rocas y los procesos geológicos tales como la depositación y compactación en rocas sedimentarias (Rees y Woodall 1975), estruc-

turas diapíricas (Kratinová et al. 2006) y desarrollo de fajas plegadas y corridas (Borradaile 1991, Housen et al. 1993, Weil y Yonkee 2009, García-Lasanta et al. 2017, Almqvist y Koyi 2018). Los modelos análogos permiten estudiar los procesos naturales, como la depositación y posterior deformación de las rocas, simulándolos a partir de experimentos en un laboratorio donde se conocen la escala y los parámetros iniciales. Comúnmente se utilizan materiales con diferentes propiedades magnéticas tales como arena, cuarzo, sílica, plastilina. Sin embargo, la adquisición de fábrica magnética es dependiente de los elementos involucrados en la deformación. Motivado por esta observación, en este trabajo se compara la adquisición de fábrica magnética en modelos sencillos de sedimentación y posterior deformación compresiva utilizando distintas mineralogías magnéticas. A partir de estos resultados se realizaron algunas recomendaciones acerca de las mineralogías más propicias para la realización de modelos análogos y su posterior estudio a partir de ASM aplicables a procesos de deformación reales.

METODOLOGIA DE TRABAJO

Se realizaron tres (3) modelos análogos en el Laboratorio de Modelado Geológico (LaMoGe) donde se simuló la sedimentación y posterior deformación compresiva, con el fin de generar una zona de faja plegada y corrida (FPyC) producto de la deformación, y una zona no deformada que represente al antepaís. De los modelos se tomaron un total de ciento setenta y cinco (175) especímenes para estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética y mineralogía magnética. Estos últimos fueron recolectados utilizando una broca de perforación para muestreo paleomagnético.

Modelado

La configuración inicial utilizada en la caja de modelado fue similar en los tres casos. Se fabricó una torta homogénea de arena sin confinamiento (para no generar condiciones de borde, Fig. 1a) sobre una lámina de acetato de 40 cm de ancho y 10 cm de largo, con el fin de formar una discontinuidad en el modelo que genere fallas y plegamientos producto de la compresión (Fig. 1a). La dimensión del modelo inicial fue de 60 cm de largo por 40 cm de ancho y 3 cm de espesor (Fig. 1a, b). Se priorizó la parte central del modelo como zona de muestreo, es decir la parte no afectada por los bordes del mismo. De esta forma, la dimensión efectiva de muestreo fue de 40 cm de largo por 20 cm de ancho (Fig. 1b, c). Con el fin de obtener una sedimentación homogénea se utilizó un

sedimentador, ubicado a una altura de 50 cm, que distribuyó el material de manera uniforme y pareja a lo largo de toda la mesa de modelado. Para el modelo A se utilizó 4 % de óxido de hierro de uso comercial (se comercializa como tinte para pinturas), para el modelo B se utilizó 0.7 % de muscovita y para el modelo C 40 % de arcilla roja de uso artístico. Los porcentajes de material magnético utilizados en cada uno de los modelos se debe a que se mantuvo la misma cantidad de material total en todos los modelos (10 kg para cada uno de los modelos). Se comprimió con un pistón cada uno de los modelos hasta lograr un acortamiento de 10 cm. Una vez finalizado el proceso, el modelo fue endurecido y solidificado, humedeciéndolo en momentos sucesivos con gelatina líquida, permitiendo que el líquido percole e infiltre en los intersticios del material para poder tomar las muestras. Se separaron dos zonas de muestreo (Fig. 1c). La zona deformada, más cercana al pistón, representando a la FPYC, y la zona más alejada del mismo, representando la zona de antepaís. Para tomar las muestras a medir, se utilizó una broca de perforación con punta de diamante, con un diámetro de 2.54 cm. El muestreo con la broca se realizó de manera manual, perpendicular a la superficie de muestreo, una vez que el modelo ya estaba endurecido.

Caracterización magnética

Con el fin de representar una analogía con rocas sedimentarias, los materiales utilizados para la realización de los modelos análogos fueron arena en combinación con óxidos de hierro (conocido en el ámbito comercial como tinte de pinturas) para el modelo A, muscovita (filosilicato de Al y Mg) para el modelo B y arcilla de uso artístico para el modelo C. La selección de los mismos radica en que son materiales comunes en los ambientes sedimentarios y en los bajos costos y la facilidad para adquirirlos. Al ser adquiridos en el mercado, no se encuentra especificada la mineralogía que compone a los mismos. Por esta razón, para caracterizar tanto su mineralogía como su comportamiento magnético, se realizaron curvas termomagnéticas donde se grafican la susceptibilidad magnética (k) en función de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Las mismas se realizaron utilizando un susceptibilímetro Kappabridge MFK1-FA equipado con un sistema de control de temperatura CS-4 (AGICO). Adicionalmente, se realizaron estudios de Rayos X con un Difractómetro Rigaku D-Max III-C con monocromador de grafito, voltaje de 35 kV, corriente de 15 mA, radiación de $\text{Cu K}_{\alpha 1,2}$, $\lambda = 1,541840 \text{ \AA}$ y un escaneo de 2° por minuto. Dichos estudios fueron efectuados en particular en el óxido de hierro y la arcilla. La mineralogía de la fracción arena fue determinada con una lupa binocular marca SCHOMFELD Optik.

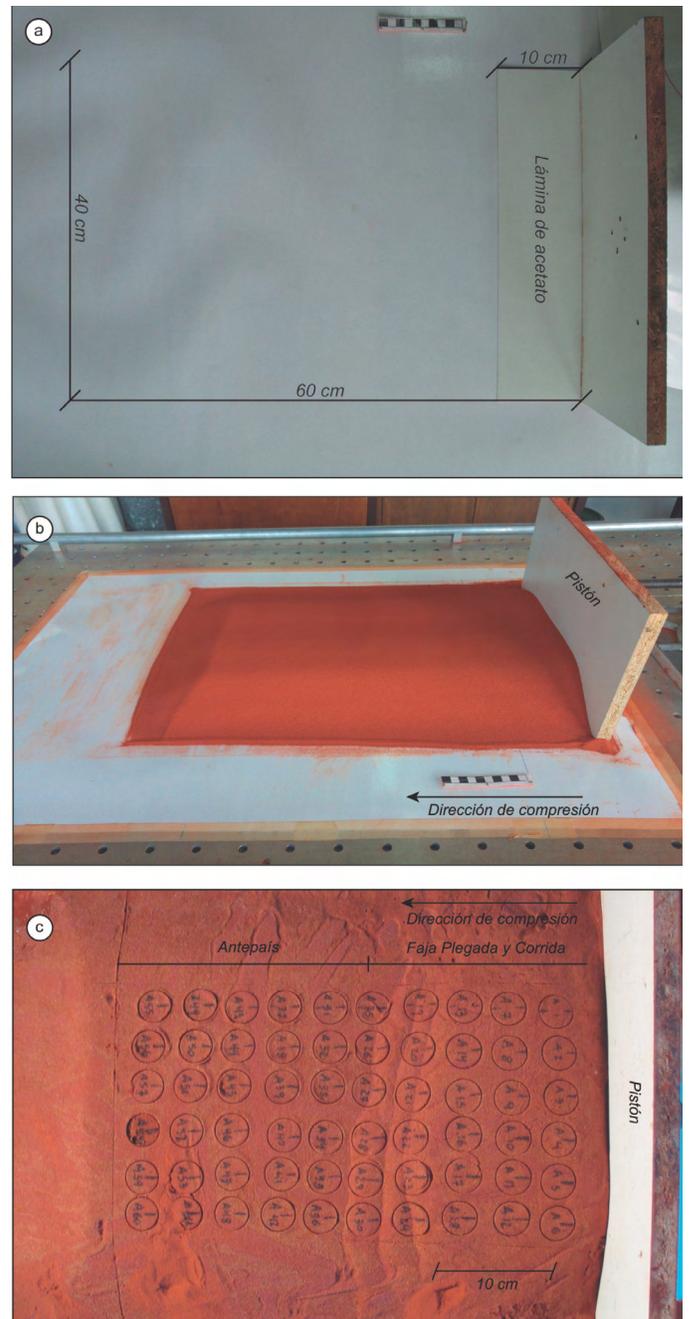


Figura 1. esquema de los modelos análogos realizados. La escala de referencia es de 10 cm: a) configuración inicial del modelo previo a la sedimentación y deformación; b) Plataforma sin deformación; c) Modelo final, luego de la deformación y posterior endurecimiento (vista en planta). Las muestras para ASM fueron tomadas utilizando una broca con punta de diamante de manera perpendicular a la superficie del modelo. 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).

Anisotropía de susceptibilidad magnética

Se tomaron un total de 175 especímenes utilizando una broca con punta de diamante, obteniendo muestras de medidas estándar para estudios paleomagnéticos (diámetro de

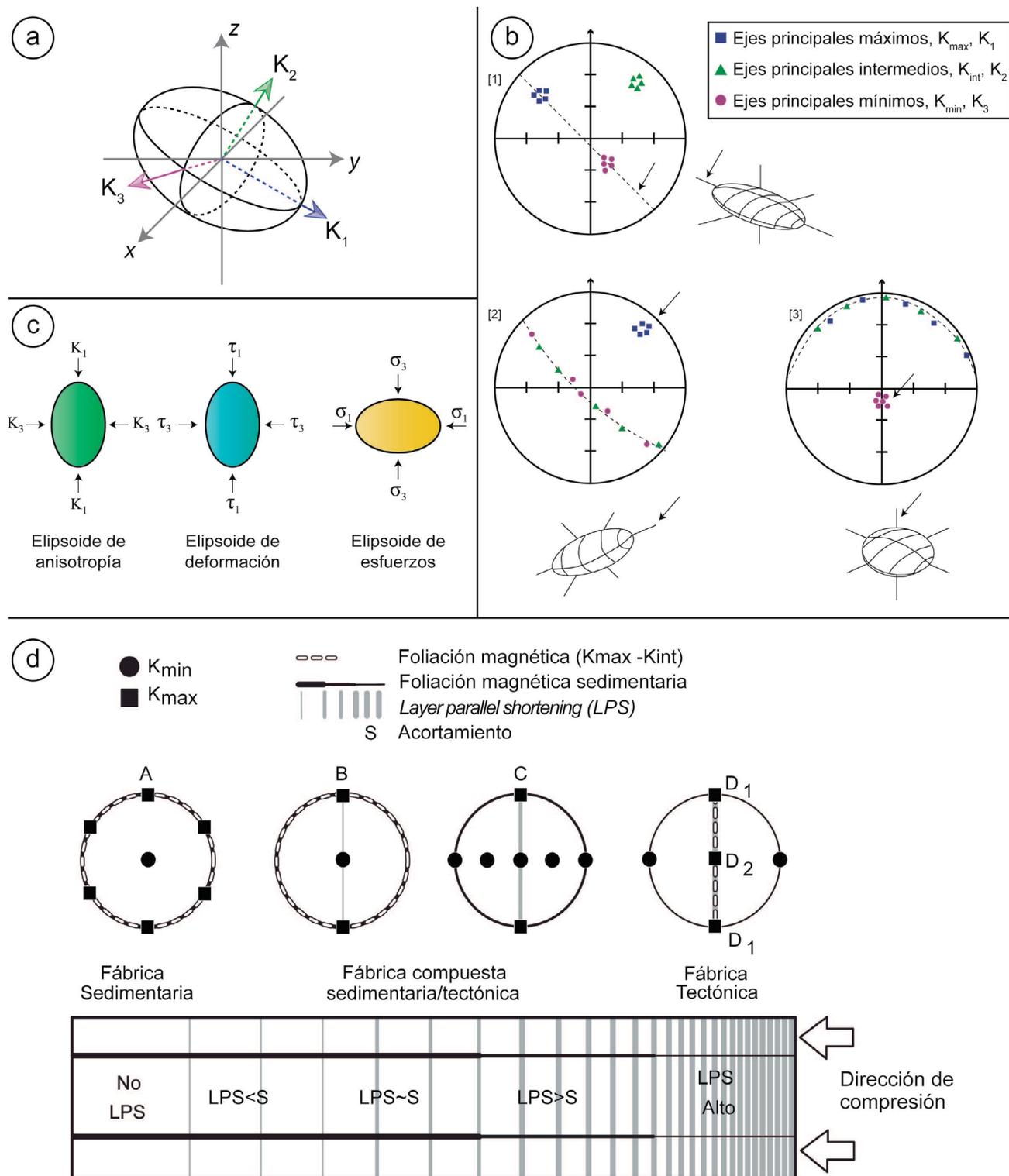


Figura 2. anisotropía de susceptibilidad magnética y su relación con la deformación: a) Elipsoide de ASM definido por los ejes máximo ($K_1=K_{max}$), intermedio ($K_2=K_{int}$) y mínimo ($K_3=K_{min}$) de susceptibilidad; b) datos direccionales graficados sobre una red estereográfica: [1] elipsoide triaxial; [2] elipsoide prolado; [3] elipsoide oblado. Tomado y modificado de Tarling y Hrouda (1993); c) relaciones entre el elipsoide de anisotropía, deformación y esfuerzo. t (tao): deformación; s (sigma): esfuerzo; d) Modelo conceptual de la evolución de la fábrica de ASM desde una fábrica primaria sedimentaria (A) sin deformación, pasando en transición a una fábrica triaxial (B), prolada (C) y oblada (D) tectónica (de izquierda a derecha). Las líneas negras indican la foliación magnética producto de la sedimentación. Las mismas se afinan hacia la zona de compresión (de izquierda a derecha) La cantidad y frecuencia de las líneas grises indican la cantidad de acortamiento paralelo a las capas (LPS, por sus siglas en inglés), mostrando su disminución en intensidad hacia el antepaís (Modificado de Weil y Yonkee 2009. Adaptada de Tomezzoli et al. 2017).

2.54 cm y altura de 2.2 cm, Fig. 1c). Las mediciones de ASM fueron realizadas a temperatura ambiente con un susceptibilímetro Kappabridge MFK-1A (AGICO). El método consiste en aplicar sobre la muestra un campo magnético de baja intensidad en 15 posiciones diferentes, con el objetivo de definir cómo la magnetización inducida es orientada debido a las anisotropías internas de la muestra. Los resultados fueron analizados con el software Anisoft 42® para obtener las direcciones resultantes, representar los elipsoides de anisotropía y sus parámetros escalares estadísticos y obtener los valores de grado de anisotropía (P_j), que indica cuánto se aleja de una esfera el elipsoide ($P_j \geq 1$, donde $P_j=1$ es una esfera), y parámetro de forma (T), que representa la simetría del elipsoide, donde $T < 0$ es prolado, $T = 0$ es neutro y $T > 0$ es oblado (Jelinek 1981; Hrouda 1982, Fig. 2a y b). Estos resultados fueron utilizados para relacionar la anisotropía de susceptibilidad magnética con la deformación (Borradaile 1991, Fig. 2c y d). De esta manera, una fábrica sedimentaria primaria está representada por un elipsoide oblado ($T > 0$), el eje K_{\min} perpendicular al plano de estratificación, y los ejes K_{\max} y K_{int} contenidos en el mismo, y a medida que aumenta la deformación el K_{\max} se ordena paralelo al eje de la estructura y perpendicular a la dirección de esfuerzo máximo (Weil y Yonkee 2009, Fig. 2 d). Otro parámetro a tener en cuenta son los valores de lineación y foliación magnética. La lineación magnética es la relación K_{\max}/K_{int} y se utiliza para caracterizar la intensidad de la orientación linear-paralela, mientras que la foliación magnética es la relación K_{int}/K_{\min} caracteriza la intensidad de la orientación planar-paralela (Hrouda 1982).

RESULTADOS

Curvas termomagnéticas

Se realizaron dos estudios de susceptibilidad vs. temperatura, una para la litología en el modelo A (óxidos de hierro) y otra para el modelo C (Arcilla). Ambos estudios presentan un comportamiento irreversible (Fig. 3) indicando la formación de nuevos minerales durante el calentamiento. En la curva correspondiente al modelo A se observó una abrupta caída alrededor de 580 °C, producto de presencia de magnetita y un marcado pico Hopkinson (Dunlop y Özdemir 1997) cerca de 680 °C que indica la presencia de hematita (Fig. 3a). En la curva correspondiente al modelo C (Fig. 3b) la caída ocurre cerca de 580 °C, indicando la presencia de magnetita como portadora de la magnetización. La caída posterior a los 580 °C sugiere que parte de la magnetización también es portada por otra mineralogía, probablemente hematita.

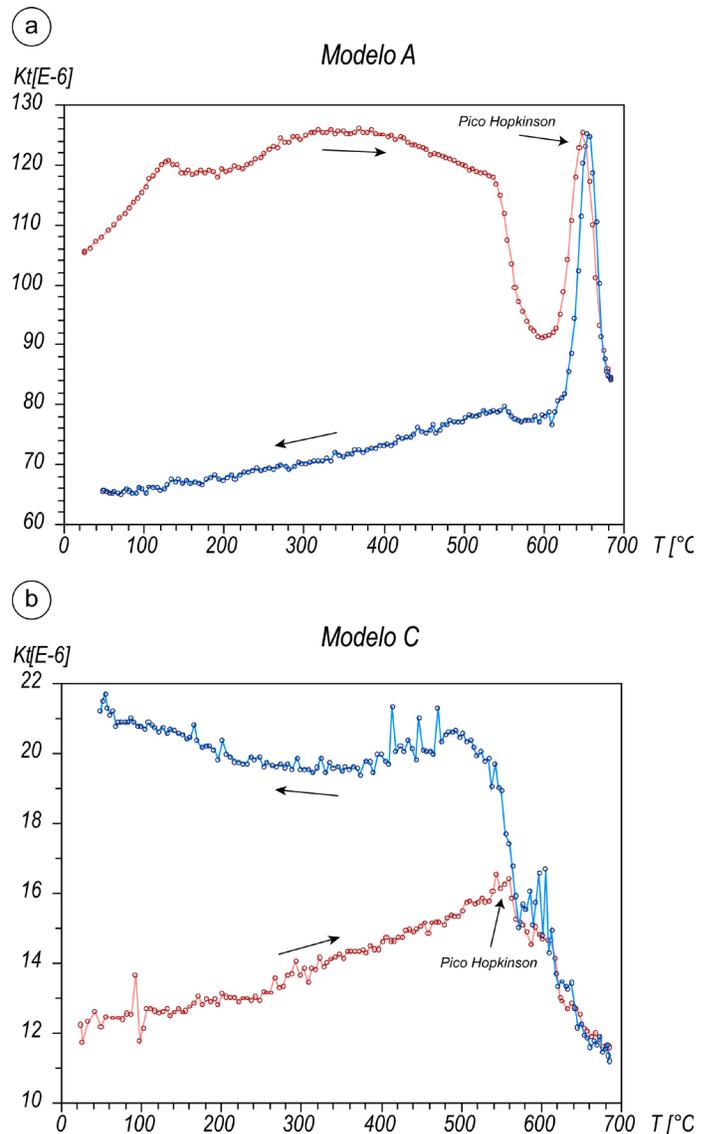


Figura 3. curvas de susceptibilidad vs temperatura realizadas en los modelos A (óxidos de hierro) y C (arcilla). Rojo: calentamiento; Azul: enfriamiento. Ambas curvas presentan un comportamiento irreversible, indicando la formación de nuevos minerales durante el calentamiento: a) En el modelo A se observa un pico Hopkinson a 680 °C, característico de la presencia de hematita; b) En el modelo C se observa un pico Hopkinson cercano a 580 °C y una caída de la susceptibilidad, indicando la presencia de magnetita. La posterior caída continua de la susceptibilidad sugiere la presencia de hematita.

Análisis macroscópico y difracción de Rayos X

La mineralogía de la fracción arena fue determinada a partir del análisis macroscópico con lupa binocular. Corresponde a una arena cuarzosa de grano fino a medio compuesta 100% por granos de cuarzo y trazas de magnetita menor al 1 % (Fig. 4 a, b).

A partir del análisis de rayos X se determinó la mineralogía de los modelos A y C. En el modelo A (óxidos de hierro comer-

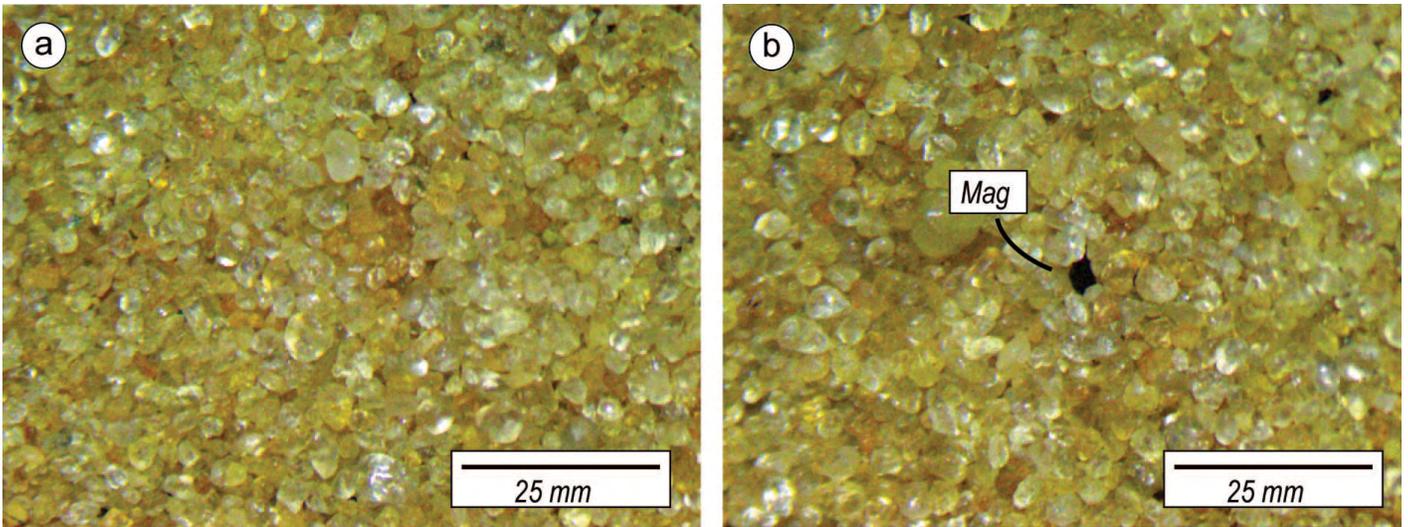


Figura 4. a) Arena cuarzosa; b) Arena cuarzosa con trazas de magnetita. Este material fue utilizado como base en los tres modelos

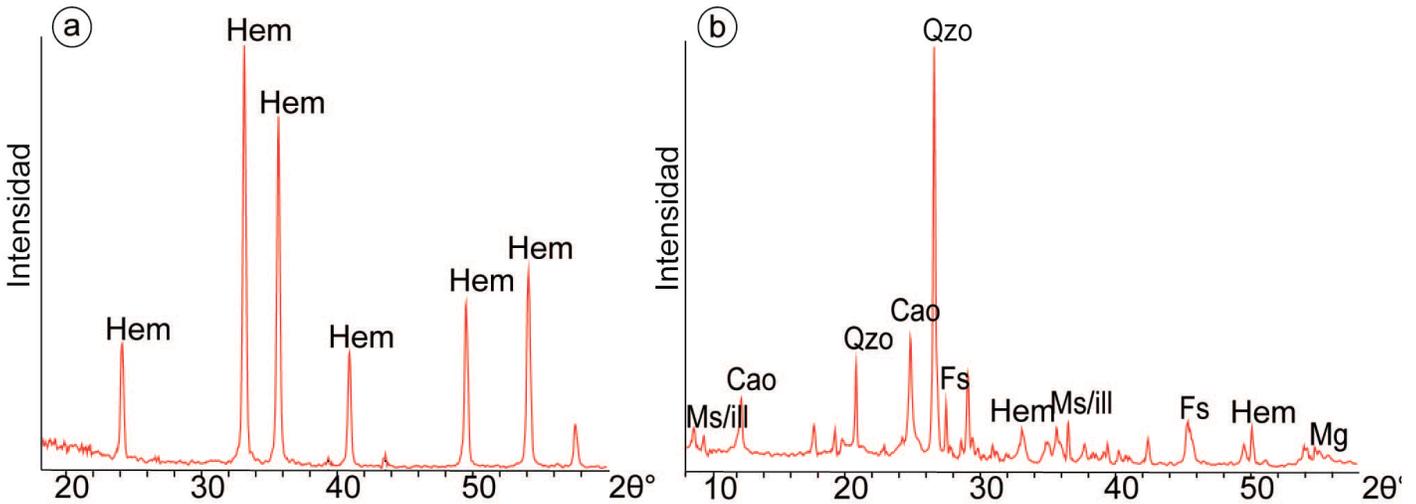


Figura 5. a) Difractograma de RX correspondiente al óxido de hierro. Se detectan picos que indican hematita (Hem); b) Difractograma de RX correspondiente a la arcilla mostrando la presencia de cuarzo (Qzo), muscovita/illita (Ms/ill), kaolinita (Cao), feldespato (Fs), hematita (Hem) y magnetita (Mg).

cial), se identificaron picos correspondientes a hematita (Fig. 5a). En el modelo C (compuesto por arcilla de uso artístico), los picos identificados corresponden a cuarzo, feldespato, minerales arcillosos (caolinita, muscovitas/illita) y óxidos de hierro (hematita, magnetita) (Fig. 5b).

Anisotropía de susceptibilidad magnética

A partir del análisis direccional de los ejes de anisotropía de susceptibilidad magnética se determinó que existe una diferencia entre la fábrica desarrollada en la FPYC (cerca al pistón) sometida a mayor deformación y la que se encuentra en la zona del antepaís, con menor influencia de la deformación (Fig. 6). En los tres modelos ensayados, en la zona de la FPYC se observan elipsoides de tipo oblados ($K_{m\acute{a}x} = K_{int} \gg$

K_{min} , $T > 0$) y triaxiales ($K_{m\acute{a}x} > K_{int} > K_{min}$). Esto resultaría en una fábrica de tipo sedimentaria deformada (Weil y Yonkee 2009) donde el $K_{m\acute{a}x}$ tiende a disponerse en dirección E-O de manera perpendicular al esfuerzo principal máximo σ_1 (acortamiento principal N-S) y el K_{min} se mantiene paralelo al polo del plano de estratificación, es decir en la vertical (Fig. 6a). Por otro lado, en la zona del antepaís se observa que en los tres modelos se dispone un elipsoide de tipo oblado, coincidente con una fábrica de tipo sedimentaria, con el K_{min} en la vertical y el $K_{m\acute{a}x}$ y K_{int} de forma aleatoria contenidos en el plano de estratificación (dispuestos en la horizontal sobre el plano ecuatorial, Fig. 6a). El parámetro de forma T en los tres modelos es mayor a 0, indicando que se desarrollan elipsoides de tipo oblado (Fig. 6b). El grado de anisotropía es mayor

en el modelo B que en los otros dos modelos. Este modelo es también el que presenta mayor dispersión en el grado de anisotropía (Fig. 6b). La susceptibilidad media (K_m), que indica el contenido neto de mineral ferromagnético, es mayor en los modelos A y C que en el modelo B, siendo el Modelo C el que presenta mayor susceptibilidad magnética. La susceptibilidad media del modelo A es de 1.11×10^{-4} SI, del modelo B de 5.46×10^{-5} SI y del modelo C de 1.33×10^{-4} SI (Cuadro 1, Fig. 6c y 7b).

En todos los modelos se observa que hay una tendencia al aumento de la foliación (K_{int}/K_{min}) hacia la zona del antepaís, a la vez que la lineación ($K_{máx}/K_{int}$) disminuye hacia la misma, con excepción del modelo A (Cuadro 1, Fig. 7a).

DISCUSIÓN

En los tres modelos realizados, los parámetros iniciales y los esfuerzos aplicados fueron los mismos. Por lo tanto, las diferencias en el desarrollo de fábricas magnéticas obtenidas en cada uno de ellos pueden adjudicarse a las mineralogías que los componen y como éstas absorben y representan la deformación, evidenciando los esfuerzos actuantes. Esta representación se refleja en la forma del elipsoide de ASM (caracterizado por el parámetro de forma T) esperados para cada sección, como así también en el grado de anisotropía (P_j) y los cambios en la lineación y la foliación.

Para los modelos realizados las situaciones representa-

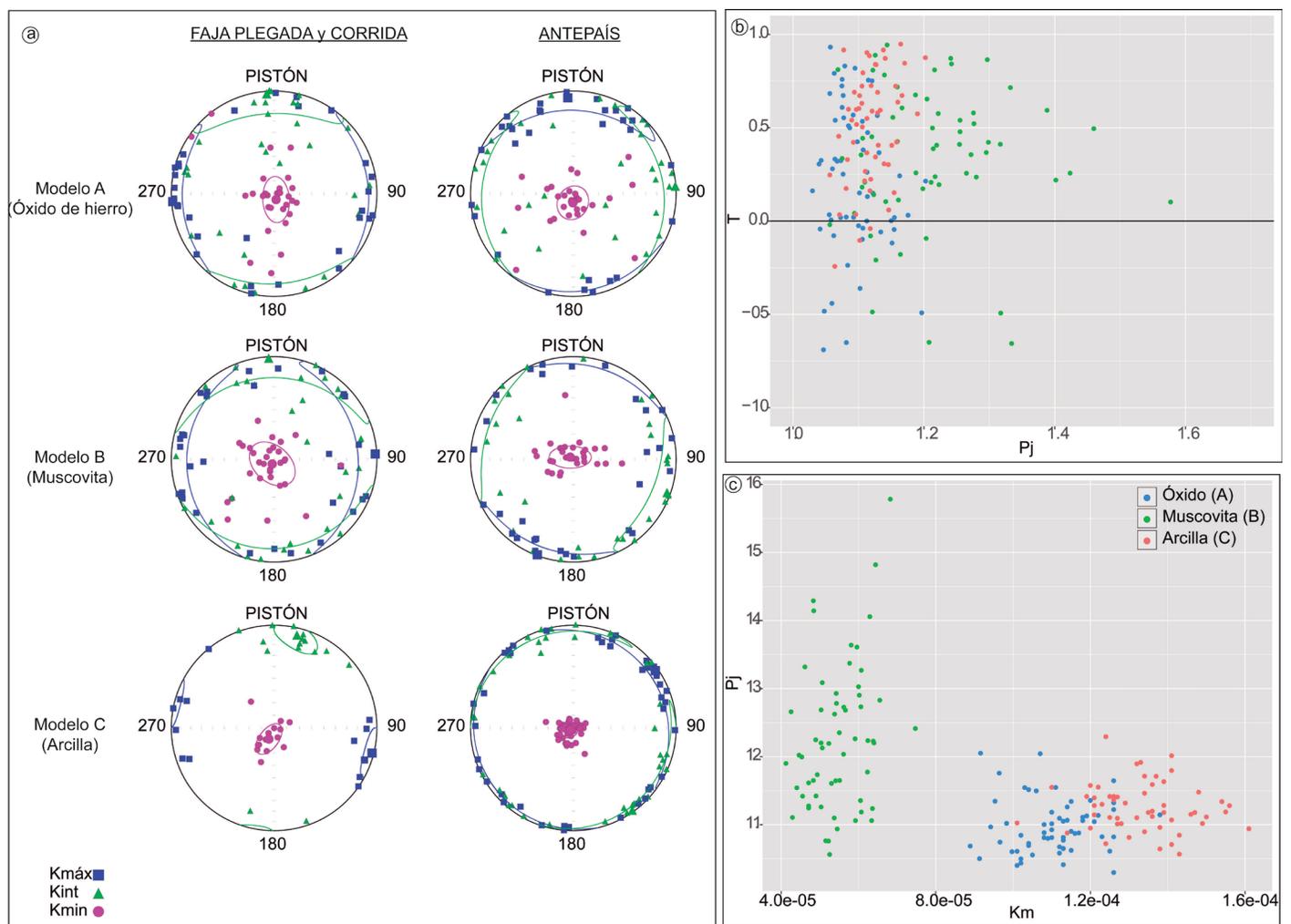


Figura 6. a) Representación de los ejes del elipsoide de anisotropía de susceptibilidad magnética dispuestos en una red estereográfica de igual área proyectados en el hemisferio Sur ($K_{máx}$: eje mayor, K_{int} : eje intermedio, K_{min} : eje menor). La compresión se realizó en un sentido N-S (es decir desde el pistón hacia el antepaís). En la zona de la faja plegada y corrida se observa que el eje K_{min} se encuentra en la vertical, mientras que el eje $K_{máx}$ tiende a disponerse a 90° del pistón, es decir en dirección E-O, con un sentido de la compresión N-S. En el modelo A y B se desarrollan elipsoides oblatos mientras que en el modelo C se desarrolla un elipsoide intermedio o triaxial. En la zona del antepaís se observa que el K_{min} se mantiene en la vertical mientras que el $K_{máx}$ y el K_{int} se disponen alrededor del mismo de forma aleatoria, contenido en el plano de estratificación. En los tres modelos se desarrollan elipsoides oblatos; b) Grado de anisotropía (P_j) vs parámetro de forma (T). El parámetro de forma T en los tres modelos tiende a ser mayor a 0, indicando que se desarrollan elipsoides de tipo oblatos. El grado de anisotropía es mayor en el modelo B que en los otros dos modelos; c) Susceptibilidad (K_m) vs grado de anisotropía (P_j). La susceptibilidad en los modelos A y C es mayor que en el modelo B.

Cuadro 1. valores medios de susceptibilidad magnética (K_m , SI), grado de anisotropía (P_j), parámetro de forma (T), lineación (L) y foliación (F) para cada uno de los modelos en general y en las zonas de la faja plegada y corrida (FPyC) y del antepaís.

	K_m	P_j	T	L	F
Modelo A					
(óxidos de hierro)	1.11×10^{-4}	1.097	0.225	1.036	1.056
FPyC	1.11×10^{-4}	1.087	0.296	1.028	1.054
Antepaís	1.10×10^{-4}	1.108	0.153	1.045	1.058
Modelo B					
(muscovita)	5.46×10^{-5}	1.226	0.344	1.066	1.140
FPyC	5.64×10^{-5}	1.242	0.126	1.085	1.136
Antepaís	5.27×10^{-5}	1.209	0.467	1.048	1.144
Modelo C					
(arcilla)	1.33×10^{-4}	1.126	0.504	1.027	1.090
FPyC	1.43×10^{-4}	1.103	0.317	1.032	1.066
Antepaís	1.30×10^{-4}	1.135	0.574	1.025	1.099

Los valores más altos de susceptibilidad corresponden al modelo C. El modelo B es el que presenta mayor grado de anisotropía. Nótese que todos los modelos presentan elipsoides de tipo oblatos ($T > 0$), con tendencia a crecer hacia el antepaís a excepción del modelo A. El incremento de T hacia el antepaís se debería principalmente a que hacia el mismo la fábrica sigue siendo de tipo primaria depositacional, presentando un elipsoide de tipo oblatado y con valores altos de foliación. Esto mismo se ve representado por el aumento de la foliación y el consecuente descenso de la lineación hacia el antepaís (ver Fig. 7).

das fueron las de la depositación de los sedimentos y la posterior deformación compresiva de los mismos. Entonces, la situación esperada es la del desarrollo de una fábrica primaria de tipo sedimentaria (K_{\min} en la vertical y perpendicular al plano de estratificación, $T > 0$) y, luego de la deformación, el desarrollo de una fábrica sedimentaria deformada (K_{\max} perpendicular a la dirección de compresión y aumento de la lineación). A su vez, es de esperar que en la zona de desarrollo de la faja plegada y corrida haya un incremento de la lineación magnética, con el K_{\max} perpendicular a la dirección de acortamiento, mientras que en la zona de antepaís sea la foliación magnética la que aumente, indicando que el esfuerzo principal actuante es el de la propia compactación del material producto de la sedimentación.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente se puede entonces caracterizar los modelos realizados y determinar cuál de ellos es el que mejor reproduce la situación antes planteada y por lo tanto el más apto para realizar estudios de fábrica magnética en modelos análogos.

El modelo A (óxidos de hierro) presenta valores altos de susceptibilidad magnética (1.11×10^{-4} SI) debido a la presencia de magnetita principalmente, y de hematita. Sin embargo, presenta un incremento en la lineación hacia el antepaís y una gran dispersión en los ejes K_{\max} del elipsoide de anisotropía en la zona de la faja plegada y corrida. Estos valores podrían deberse a que el tamaño de grano del material utilizado no es lo suficientemente pequeño como para reproducir más fidedignamente la fábrica magnética y por lo tanto se

enmascara la posición de los ejes de anisotropía luego de la deformación. También es necesario considerar la cantidad de material usado. Al usar sólo el 4% de material magnético en el modelo, la cantidad de magnetita presente en los óxidos de hierro no parecería ser suficiente para apreciar el desarrollo de una fábrica magnética más evidente.

El modelo B (muscovita) presenta la menor susceptibilidad (5.46×10^{-5} SI) ya que la muscovita (filosilicato de Al y Mg) no contiene cantidades significativas de Fe. La fábrica reproducida en este modelo es resultado principalmente de la anisotropía de forma del mineral debido a su hábito planar, en donde las láminas tienden a disponerse de manera dispersa y aleatoria en el plano de sedimentación, aun cuando son compactadas (evidencia que se ve reflejada en el hecho que el modelo B es el que mayor grado de anisotropía (P_j) presenta). La anisotropía planar de la muscovita conduce a que haya una mínima susceptibilidad a la magnetización en la dirección normal al plano basal K_{\min} (Borradaile et al. 1987, Biedermann et al. 2014). Por lo tanto, puede observarse que el eje K_{\min} tiende a agruparse perpendicular al plano de sedimentación (Fig. 6a). Sin embargo, el uso de la muscovita estaría permitiendo ver sólo el acomodamiento de los cristales planares debido a la sedimentación, pero los mismos no se distribuyen de acuerdo a la dirección de los esfuerzos una vez que comienza la deformación. Harían falta más etapas de deformación, con mayores valores de acortamiento, para evaluar el comportamiento de la muscovita durante la deformación.

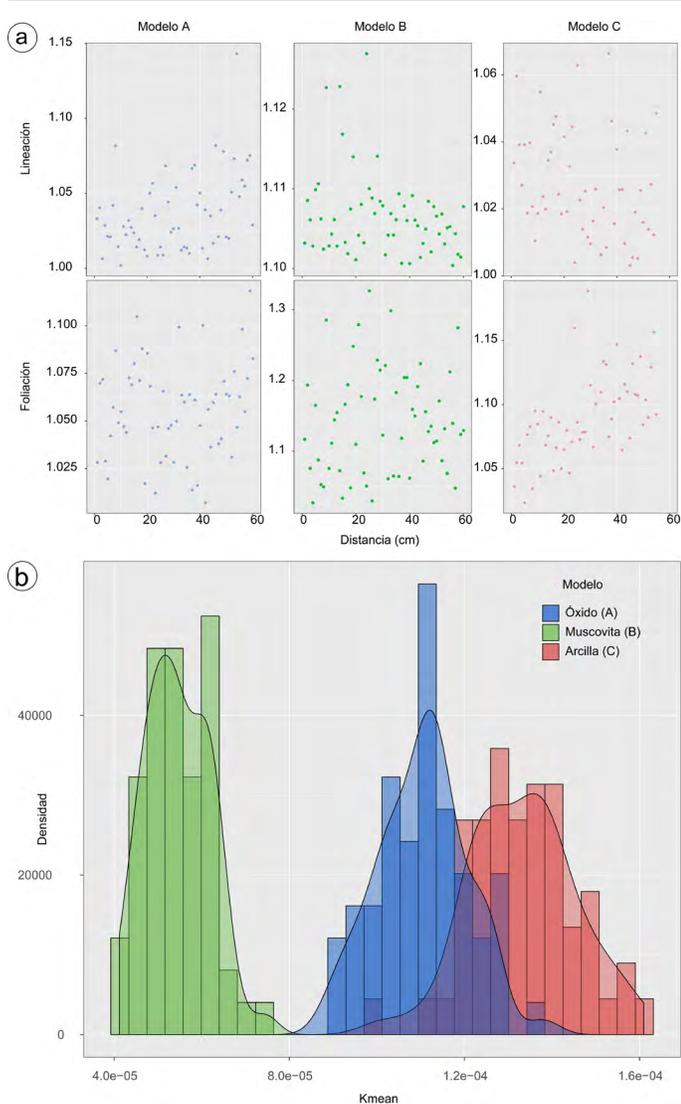


Figura 7. a) lineación/foliación vs distancia al pistón. La foliación tiende a incrementar hacia el antepaís mientras que la lineación tiende a disminuir hacia el mismo; b) histograma mostrando la susceptibilidad media de cada modelo. Nótese que los modelos A y C son un orden de magnitud mayor que el modelo B, siendo el modelo C el que presenta mayor susceptibilidad media.

El modelo C (arcilla) presenta la mayor susceptibilidad magnética (1.33×10^{-4} SI) debido a la presencia de magnetita y hematita. A su vez, es el que mejor reproduce la fábrica magnética esperada, tanto sedimentaria como tectónica. Este comportamiento se observa en la distribución de los ejes de anisotropía en las dos zonas del modelo. Particularmente, el eje $K_{m\acute{a}x}$ se dispone de manera perpendicular al esfuerzo actuante en la zona de la faja plegada y corrida, mientras que en la zona del antepaís tiende a ubicarse contenido en el plano de estratificación de manera aleatoria. A su vez el eje $K_{m\acute{i}n}$ permanece perpendicular al plano de sedimentación en todo el modelo (Fig. 6a), dando como resultado una fábrica

sedimentaria deformada (Fig. 2d). Por último, es notable como la lineación es más evidente en la zona deformada y tiende a disminuir hacia la zona no deformada, mientras que ocurre lo contrario con la foliación. Esta tendencia estaría demostrando que en el antepaís prevalece la fábrica primaria sedimentaria, mientras que en la zona de la faja plegada y corrida la fábrica magnética primaria es deformada producto de la compresión. La mineralogía magnética de la arcilla (que presenta minerales ferromagnéticos como la magnetita), su tamaño de grano pequeño y su plasticidad, permiten acomodarse y absorber fácilmente el esfuerzo actuante. A su vez, la cantidad significativa de arcilla utilizada en el modelo (40%) sería fundamental en la adquisición y el desarrollo de la fábrica magnética durante la deformación ya que es el único modelo en el que se pudo apreciar el desarrollo de una fábrica sedimentaria en la zona no deformada y una fábrica intermedia o triaxial en la zona de desarrollo de la FPYC

CONCLUSIONES

En los modelos realizados se observaron diferencias en las fábricas magnéticas resultantes entre sí y dentro de los mismos (zona de la FPYC y zona del antepaís). Se observó que la ASM responde de manera sensible a la deformación e incluso a la sedimentación del material a utilizar en modelos análogos. En el sector de la FPYC donde hay mayor deformación, si bien el $K_{m\acute{i}n}$ permanece en la vertical, los ejes $K_{m\acute{a}x}$ y $K_{i\acute{n}t}$ rotan para colocarse en la dirección de mayor elongación (E-O), esto es perpendicular a la dirección de mayor acortamiento (N-S). En la zona del antepaís, con menor influencia de los esfuerzos, se adquiere una fábrica magnética sedimentaria típica, con el $K_{m\acute{i}n}$ en la vertical y el $K_{m\acute{a}x}$ y $K_{i\acute{n}t}$ en el plano horizontal orientados de manera aleatoria. Esta fábrica adquirida es producto de la propia sedimentación del modelo. A su vez, la tendencia de la lineación y la foliación magnética y cómo éstas representan la dirección de los esfuerzos que actúan luego de la depositación, se ve fuertemente influenciada por la mineralogía magnética y el tamaño de grano de los sedimentos, como así también de las cantidades de material magnético utilizado. El modelo C, compuesto por arcilla, es el que mejor reproduce la adquisición de la fábrica magnética en modelos análogos ensayados, en donde se observa una clara orientación de los ejes de susceptibilidad, de la lineación y de la foliación magnéticas de acuerdo a la deformación. Es por lo tanto el más apto de los utilizados para realizar estudios de fábrica magnética en modelados análogos aplicables a situaciones geológicas reales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias a la colaboración y el apoyo del Laboratorio de Modelado Geológico (LAMOGE) de la UBA. Todas las mediciones fueron realizadas en el laboratorio de paleomagnetismo “Daniel A. Valencio” de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA y en el Laboratorio de Rayos X (Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur). Se agradece al proyecto PIP-CONICET-11220170100411CO. Los autores de este trabajo agradecen a Eugenio Sewchuk por su ayuda y contribución al realizar los modelos. Se agradece también al Editor y los Revisores por sus comentarios y sugerencias que mejoraron significativamente este manuscrito.

REFERENCIAS

- Almqvist, B.S.G. y Koyi, H. 2018. Bulk strain in orogenic wedges based on insights from magnetic fabrics in sandbox models. *Geology* 46: 483-486.
- Biedermann, A.R., Bender Koch, C., Lorenz, W.E.A. y Hirt, A.M. 2014. Low-temperature magnetic anisotropy in micas and chlorite. *Tectonophysics* 629: 63-74.
- Borradaile, G.J. 1988. Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics* 156: 1-20.
- Borradaile, G.J. 1991. Correlation of strain with anisotropy of magnetic susceptibility (AMS). *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH* 135: 15-29.
- Borradaile, G., Keeler, W., Alford, C. y Sarvas, P. 1987. Anisotropy of magnetic susceptibility of some metamorphic minerals. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 48: 161-166.
- Calvagno, J.M., Gallo, L.C., Tomezzoli, R.N., Cristallini, E.O., Farjat, A.D. y Hernández, R.M. 2020. A new constraint on the central Andean rotation pattern from paleomagnetic studies in the southern Subandes of Bolivia. *Journal of South American Earth Sciences* 98: 102470.
- Dunlop, D.J. y Özdemir, O. 1997. *Rock magnetism: fundamentals and frontiers*. Cambridge University Press, 573 p., Cambridge.
- Eichelberger, N. y McQuarrie, N. 2014. Three-dimensional (3-D) finite strain at the central Andean orocline and implications for grain-scale shortening in orogens. *Geological Society of America Bulletin*: 87-112.
- Engelder, T. y Geiser, P. 1979. The relationship between pencil cleavage and lateral shortening within the Devonian section of the Appalachian Plateau, New York. *Geology* 7: 460-464.
- García-Lasanta, C., Izquierdo-Llavall, E. y Román-Berdiel, T. 2017. Análisis de la fábrica magnética en modelos analógicos de arcillas. *Geogaceta* 61: 103-106.
- Geiser, P.A. 1988. Mechanisms of thrust propagation: some examples and implications for the analysis of overthrust terranes. *Journal of Structural Geology* 10: 829-845.
- Housen, B.A., Richter, C. y van der Pluijm, B.A. 1993. Composite magnetic anisotropy fabrics: experiments, numerical models and implications for the quantification of rock fabrics. *Tectonophysics* 220: 1-12.
- Hrouda, F. 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Surveys* 5: 37-82.
- Jelinek, V. 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics* 79: T63-T67.
- Kratinová, Z., Závada, P., Hrouda, F. y Schulmann, K. 2006. Non-scaled analogue modelling of AMS development during viscous flow: A simulation on diapir-like structures. *Tectonophysics* 418: 51-61.
- Mitra, G. y Adolph Yonkee, W. 1985. Relationship of spaced cleavage to folds and thrusts in the Idaho-Utah-Wyoming thrust belt. *Journal of Structural Geology* 7: 361-373.
- Ong, P.F., van der Pluijm, B.A. y Van der Voo, R. 2007. Early rotation and late folding in the Pennsylvania salient (U.S. Appalachians): Evidence from calcite-twinning analysis of Paleozoic carbonates. *Bulletin of the Geological Society of America* 119: 796-804.
- Parés, J.M. 2015. Sixty years of anisotropy of magnetic susceptibility in deformed sedimentary rocks. *Frontiers in Earth Science* 3: 4, 1-13.
- Parés, J.M., Van der Pluijm, B.A., y Dinarès-Turell, J. 1999. Evolution of magnetic fabrics during incipient deformation of mudrocks (Pyrenees, northern Spain). *Tectonophysics* 307: 1-14.
- Rees, A.I. y Woodall, W.A. 1975. The magnetic fabric of some laboratory-deposited sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 25: 121-130.
- Tarling, D.H. y Hrouda, F. 1993. *The magnetic anisotropy of rocks*. Springer. 217 p., Berlin.
- Tomezzoli, R.N., Arzadún, G. y Cristallini, E.O. 2017. Anisotropía de susceptibilidad magnética y paleomagnetismo en la Formación Lolén de edad devónica, Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica* 74: 326-337.
- Weil, A. B. y Yonkee, A. 2009. Anisotropy of magnetic susceptibility in weakly deformed red beds from the Wyoming salient, Sevier thrust belt: Relations to layer-parallel shortening and orogenic curvature. *Lithosphere* 1: 235-256.
- Yonkee, A. y Weil, A.B. 2010. Reconstructing the kinematic evolution of curved mountain belts: Internal Reconstructing the kinematic evolution of curved mountain belts: Internal strain patterns in the Wyoming salient, Sevier thrust belt, U.S.A.