

# Estudios paleomagnéticos y de magnetismo de rocas en testigos de sedimento cortos de Laguna Azul, Argentina

## *Paleomagnetic and rock magnetic studies in short sediment cores from Laguna Azul, Argentina*

Romina Achaga<sup>1,\*</sup>, Claudia Susana Gabriela Gogorza<sup>1</sup>, María Alicia Irurzun<sup>1</sup>, Avto Goguitchaichvili<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Bs. As. (UNCPBA), Consejo de Investigaciones Científicas (CIC), Pinto 399, Tandil, 7000, Argentina.

<sup>2</sup>Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA), Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Campus Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, México.

\* Autor para correspondencia: (R. Achaga)  
romi.achaga@gmail.com

### Cómo citar este artículo:

Achaga, R., Gogorza, C.S.G., Irurzun, M.A., Goguitchaichvili, A., 2024, Estudios paleomagnéticos y de magnetismo de rocas en testigos de sedimento cortos de Laguna azul, Argentina: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 76 (3), A200424. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2024v76n3a200424>

Manuscrito recibido: 20 de Octubre de 2023  
Manuscrito corregido: 10 de Marzo de 2024  
Manuscrito aceptado: 17 de Abril de 2024

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

## RESUMEN

Este estudio presenta un análisis de los primeros datos paleomagnéticos y de magnetismo de rocas obtenidos a partir de testigos de sedimentos lacustres en la laguna Azul en la región de la meseta de Somuncurá en Argentina. El objetivo principal fue caracterizar las propiedades magnéticas de los sedimentos y aportar los primeros datos direccionales paleomagnéticos en esta región. Se identificó como portador magnético principal de la (titano)magnetita. Aunque no se cuenta con dataciones por radioisótopos, se ha empleado un marcador cronoestratigráfico correspondiente a un nivel rico en carbono orgánico en  $1980 \pm 2$  AD para estimar la tasa de sedimentación. Se contrastaron los resultados de inclinación y declinación magnética obtenidos con modelos geomagnéticos globales. Los resultados obtenidos sugieren que la laguna Azul es un sitio potencialmente valioso para futuras investigaciones paleomagnéticas. Además, se realizó un análisis preliminar de las variaciones paleoambientales de cada unidad sedimentaria a través de los resultados de magnetismo de rocas y de las estimaciones de materia orgánica.

**Palabras clave:** paleomagnetismo, magnetismo de rocas, sedimentos de lago, Meseta de Somuncurá.

## ABSTRACT

*This study presents the first paleomagnetic and rock magnetic results from sediment cores collected in Laguna Azul, located in the Somuncurá Plateau region in Argentina. The main objective is to characterize the magnetic properties of the sediments and provide the first paleomagnetic directional data in this region. The primary magnetic carrier was identified as (titano)magnetite. While radioisotope dating has not yet been obtained, a chronostratigraphic marker from a level rich in organic carbon is used to estimate the sedimentation rate. The magnetic inclination and magnetic declination results obtained have been compared with global geomagnetic models. The obtained results suggest that Laguna Azul is a potentially valuable site for future paleomagnetic research. Additionally, a preliminary paleoenvironmental analysis was carried out for each sedimentary unit using the rock magnetic and organic matter results.*

**Keywords:** paleomagnetism, rock-magnetism, lake sediments, Somuncurá Plateau.

## 1. Introducción

La mayoría de los datos paleomagnéticos de América del Sur provienen de flujos de lava y restos arqueológicos de arcilla producidos después de la llegada de los europeos en 1500 AD. Los recientes avances en la adquisición de datos arqueomagnéticos en Sudamérica (Gogorza *et al.*, 2017, 2018; Goguitchaichvili *et al.*, 2019, 2023; Poletti *et al.*, 2016; Roperch *et al.*, 2015; Tarduno *et al.*, 2015) son esenciales para la reconstrucción de la evolución del campo magnético terrestre durante el Holoceno en la región y solo contribuyen un 2.8% a la base de datos geomagnética mundial (Brown *et al.*, 2015). Como consecuencia, los únicos y escasos registros continuos del campo geomagnético para Sudamérica que permiten estudiar en escala de tiempo milenaria las variaciones durante el Holoceno provienen de estudios de sedimentos lacustres (Gogorza *et al.*, 2004, 2006, 2011, 2012, 2018, 2021; Irurzun *et al.*, 2006, 2017; Palermo *et al.*, 2019) y espeleotemas (Trindade *et al.*, 2018), pero ninguno de ellos fue realizado en el noreste de la Patagonia argentina.

Además, la presencia de la Anomalía del Atlántico Sur (SAA, por sus siglas en inglés), una región de baja intensidad de campo magnético en Sudamérica, hace que los estudios en esta área sean aún más relevantes. Los datos históricos geomagnéticos muestran que el tamaño de la anomalía ha aumentado de forma concomitante con la disminución de la intensidad del campo dipolar y que la anomalía ha migrado continuamente hacia el oeste (Finlay *et al.*, 2016; Hartmann & Pacca, 2009; Pavón-Carrasco y De Santis, 2016).

Su longevidad a escalas de tiempo milenarias es difícil de determinar debido a la escasez de datos geomagnéticos continuos en África y Sudamérica (Trindade *et al.*, 2018). Por lo tanto, es necesario contar con más estudios paleomagnéticos de sedimentos lacustres en Sudamérica para mejorar los modelos geomagnéticos mundiales y para estudiar una de las características más importantes del campo magnético terrestre, la SAA.

Además, la reconstrucción de la variabilidad

ambiental del pasado reciente tiene gran importancia para definir las tendencias naturales y el impacto de la acción humana, así como para predecir futuros escenarios ambientales. Los cambios ambientales en el área alrededor de la cuenca (períodos de lluvias y sequías, temperatura, tasas de sedimentación, entre otros) se reflejan en las variaciones de los parámetros magnéticos (Maher y Thompson, 1999). En particular, las variaciones en la concentración, mineralogía y tamaño de grano de los minerales magnéticos se utilizan para caracterizar los sedimentos. Las propiedades magnéticas de los sedimentos nos ayudan a establecer modelos y correlaciones con estudios anteriores, aunque es necesario realizar un análisis multiparamétrico que incluya técnicas magnéticas y no magnéticas para interpretarlos correctamente (Geiss *et al.*, 2004; Maher y Thompson, 1999). Numerosos estudios han utilizado parámetros magnéticos para investigar sedimentos lacustres en Argentina (*e.g.*, Irurzun *et al.*, 2009, 2014; Lisé-Pronovost *et al.*, 2014, 2015; Recasens *et al.*, 2012) pero ninguno de ellos se ha hecho en la meseta de Somuncurá y en la región noreste de la Patagonia Argentina.

Este trabajo presenta la Variación Paleosecular (PSV, por sus siglas en inglés) direccional registrada en los sedimentos de Laguna Azul y su comparación con 4 modelos geomagnéticos globales. Además, se presenta un análisis de magnetismo de rocas y estimaciones de materia orgánica en las unidades sedimentarias identificadas en los sedimentos, con el objetivo de inferir en forma preliminar posibles escenarios paleoambientales en Laguna Azul.

## 2. Descripción del área de trabajo

La meseta de Somuncurá se halla comprendida entre los 66° y 68° de longitud O y 41° y 43° de latitud S, y se ubica entre las provincias de Chubut y Río Negro de Argentina. Es un macizo geológico que se distingue por su altitud, superando los 1000 metros sobre el nivel del mar, y su cobertura

geológica de lava, se formó durante el período Terciario (Lynch y Terranova, 2019). Este macizo, compuesto en su mayoría por rocas precámbricas y tectónicamente estable (Brune 1969 en Aguilera, 2005), se extiende desde la región andina hasta la costa atlántica de manera discontinua, caracterizado por formaciones rocosas como los basaltos de olivino de la Formación Somuncurá, que presentan un color gris y una estructura vesicular o amigdaloidal, además de cuerpos volcánicos posteriores a la creación de la meseta (Maro y Remesal, 2012).

El clima en esta región es árido y fresco, con precipitaciones anuales que raramente superan los 300 milímetros, lo que genera un marcado déficit hídrico en distintos períodos del año (Masera, 1998). Asimismo, como resultado de los distintos

procesos erosivos que tienen lugar en la región, en la meseta se registran bajos de distintas dimensiones. La erosión eliminó fácilmente esas rocas friables, profundizando las incipientes depresiones por combinación de factores concurrentes, como meteorización, deflación y sublavado, sumándose más tarde los deslizamientos.

Dentro de la meseta se presentan estos bajos donde actualmente se encuentran diversas cuencas endorreicas siendo la Laguna Azul una de ellas. Esta laguna se sitúa a los  $41^{\circ} 17' S$  y  $66^{\circ} 50' O$ , en la zona noreste de la Meseta de Somuncurá, a una altitud de aproximadamente 1179 metros sobre el nivel del mar, y presenta una morfología única con dimensiones de aproximadamente 1.24 kilómetros de ancho, 0.69 kilómetros de largo y una profundidad de 50 metros (Franchi *et al.*, 2001).

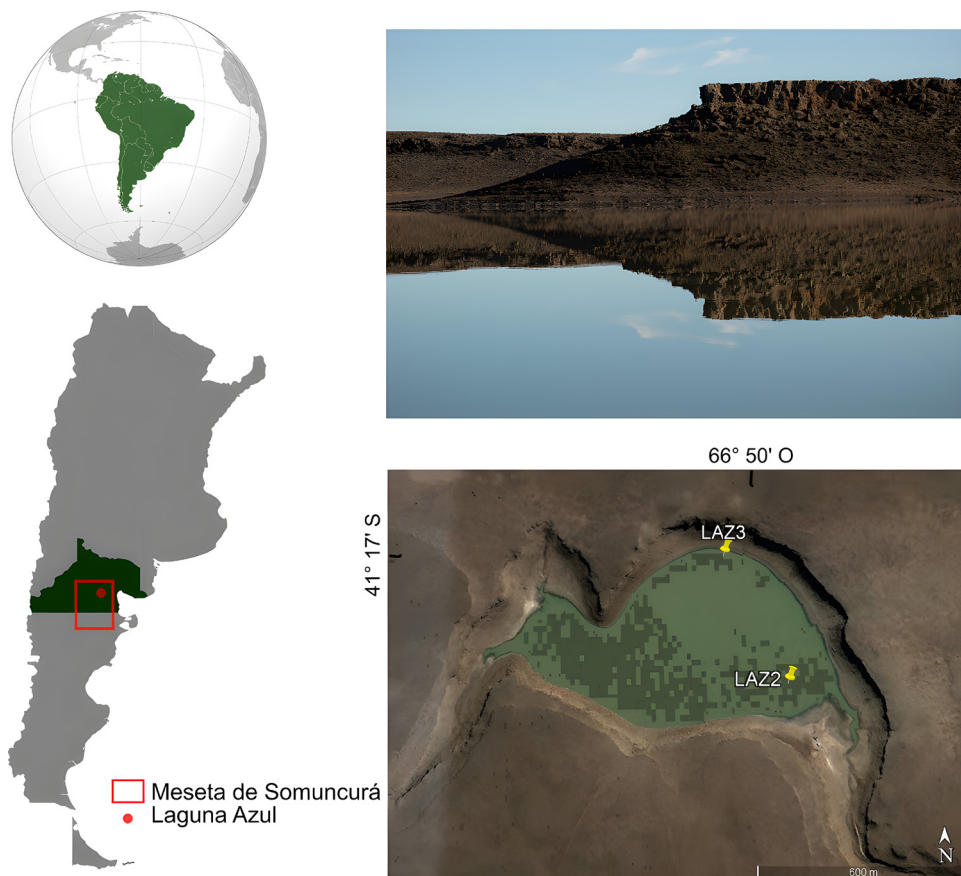


Figura 1 Ubicación de la Laguna Azul y de los sitios de extracción de testigo.

### 3. Metodología

En el mes de mayo de 2022 se realizó una campaña de muestreo para extraer testigos de la laguna Azul. Se recogieron dos testigos, LAZ2 de 35 cm de longitud y LAZ3 de 16 cm de longitud (Figura 2), de sitios opuestos, uno al norte y otro al sur (Figura 1). Los testigos se extrajeron utilizando un tubo cilíndrico de 63 mm de diámetro externo que fue hincado en el sedimento utilizando una masa. Luego fueron llevados al laboratorio y almacenados en una cámara oscura y fría (4°C). Los testigos se abrieron por la mitad y se describieron litológicamente. Sobre una de las mitades se midió la susceptibilidad magnética (k) cada 0.5 cm con un sensor de lectura puntual Bartington MS2E. Luego se sub-muestrearon colocando cubos plásticos de 20 mm de lado uno a continuación del

otro. Se obtuvieron un total de 15 muestras para el testigo LAZ2 y 7 muestras para el testigo LAZ3.

Sobre las muestras cúbicas se midió la susceptibilidad magnética (k) a 0.47 kHz ( $k_{low}$ ) y 4.7 kHz ( $k_{high}$ ) utilizando un susceptibilímetro magnético Bartington MS2 (mediciones realizadas en CIFICEN, UNICEN, Argentina). Estos valores se utilizaron para calcular el factor de susceptibilidad F dependiente de la frecuencia ( $F=100 \cdot (k_{low} - k_{high}) / k_{low}$ ). Luego, se midió la intensidad de la Magnetización Remanente Natural (NRM, por sus siglas en inglés) y las direcciones (declinación D, e inclinación I). La estabilidad de la NRM de las muestras se analizó mediante la desmagnetización progresiva por campos alternos (AF, por sus siglas en inglés) decrecientes con intensidades de pico máximas de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80 y 100 mT para determinar a qué valo-

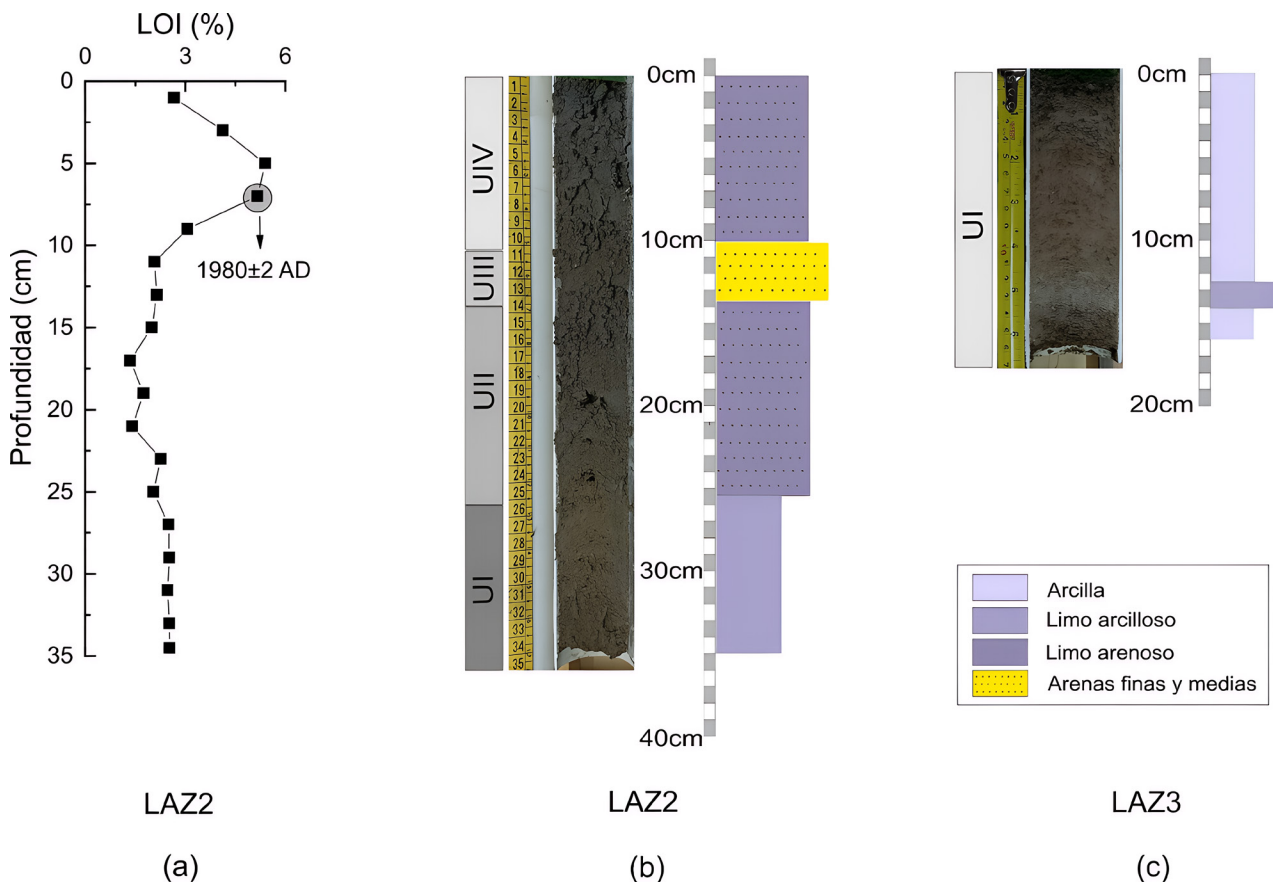


Figura 2 (a) Registro de LOI en función de la profundidad para LAZ2. Litología de los testigos (b) LAZ2 y (c) LAZ3.

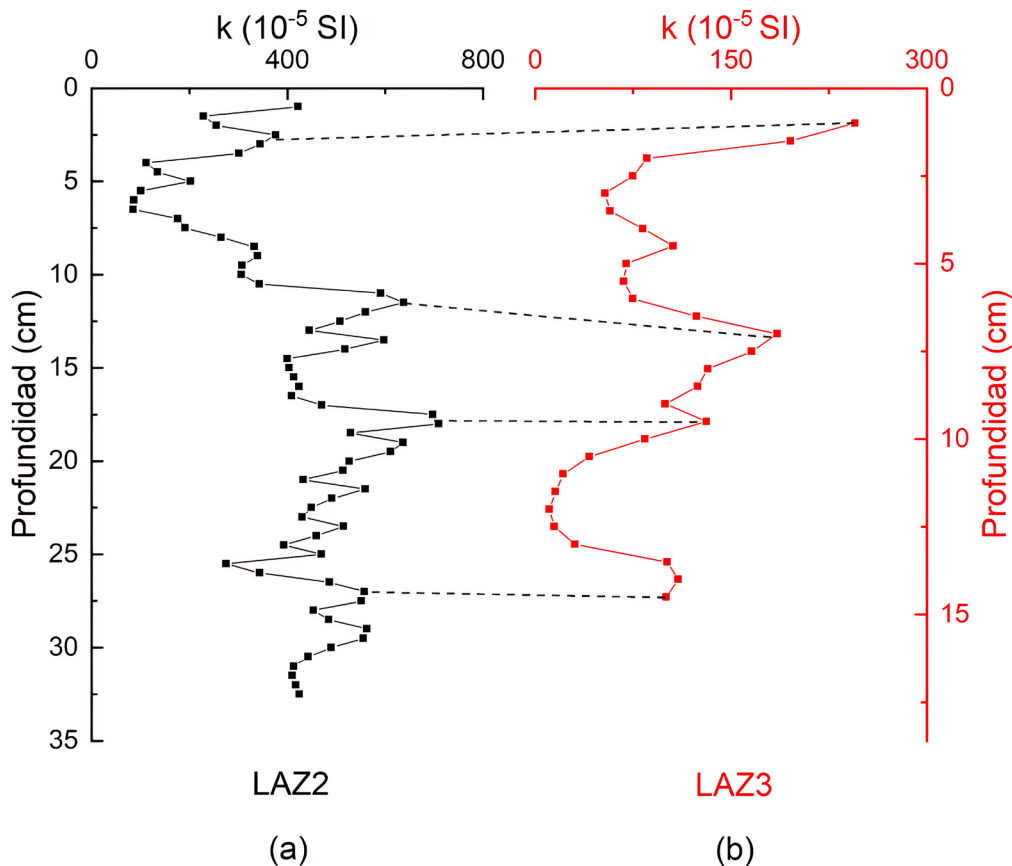
res de campo magnético se eliminan las magnetizaciones secundarias y se rescata la Magnetización Remanente Primaria. Las direcciones de la magnetización remanente estable se determinarán por medio del análisis vectorial de los resultados de la desmagnetización según Kirschvink (1980).

Sobre las muestras de LAZ2 se realizaron las mediciones de Magnetización Remanente Anhisterética (ARM, por sus siglas en inglés) que fue adquirida utilizando un campo pico AF de 100 mT y un campo continuo de 0.05 mT. Para las mediciones de NRM y ARM se utilizó un magnetómetro *2G Rapid Superconducting Rock* y un desmagnetizador AF ASC D2000T (mediciones realizadas en IPGP-Université Paris Cité, Francia).

Para la adquisición de la Magnetización Remanente Isotérmica (IRM, por sus siglas en inglés) se utilizó con un magnetómetro de mues-

tra vibrante (VSM) Micromag 3900 (mediciones realizadas en IPGP-Université Paris Cité, Francia) empleando campos crecientes hasta 1.2 T, alcanzando la saturación (SIRM). Posteriormente, se aplicaron campos opuestos hasta 300 mT para calcular el campo para el que la magnetización se hace cero (campo coercitivo remanente,  $B_{CR}$ ). Se calcularon los parámetros asociados  $S_{ratio}$  ( $-IRM_{300mT}/SIRM$ , Turner, 1997),  $SIRM/k$ ,  $ARM/k$  y  $ARM/SIRM$ .

Se seleccionaron cuatro muestras del testigo LAZ2 para realizar curvas termomagnéticas. Se midió  $k$  durante el calentamiento (entre 20 y 700°C) y enfriamiento (entre 700 y 20°C) cada aproximadamente 2°C, utilizando un Sistema KappaBridge KLY3-Agico (mediciones realizadas en IPGP-Université Paris Cité, Francia). En estas mismas cuatro muestras se determinaron ciclos de



**Figura 3** Registros de  $k$  en función de la profundidad para (a) LAZ2 y (b) LAZ3. Las líneas punteadas muestran los puntos de correlación entre los testigos.



histéresis utilizando el magnetómetro de muestra vibrante anteriormente mencionado.

También, se cuantificó la cantidad de materia orgánica utilizando la técnica de pérdida de masa por calcinación (LOI, por sus siglas en inglés). Las muestras fueron secadas a 105°C durante 12 horas, pesadas, calcinadas durante 3 horas a 550°C y nuevamente pesadas. Se consideró que el material volatilizado es la fracción orgánica (Walter, 1974).

### 3.1. LITOLOGÍA

Basándose en la composición granulométrica, se identificaron cuatro unidades sedimentarias en el testigo LAZ2 y una unidad sedimentaria en el testigo LAZ3.

En el testigo LAZ2 (Figura 2b), la unidad I (UI)

se extiende desde la base del testigo hasta los 25.5 cm. Está conformada mayoritariamente por limos arcillosos y los valores de LOI (Figura 2a) indican una baja proporción de materia orgánica. En la unidad II (UII), que se extiende desde una profundidad de 25.5 cm hasta los 13.5 cm, la textura del sedimento cambia y se observa un tamaño de grano predominantemente mayor y la presencia de limos arenosos.

La unidad III (UIII) se extiende desde la base de la unidad UII y hasta los 10 cm, siendo una franja que se diferencia del resto del testigo por la presencia de arenas finas y medias.

La unidad IV (UIV) se caracteriza por tener una textura muy similar a UII, pero el contenido de materia orgánica aumenta alcanzando los valores más altos de LOI (Figura 2a), notable incluso por el cambio de coloración a más oscuro en los

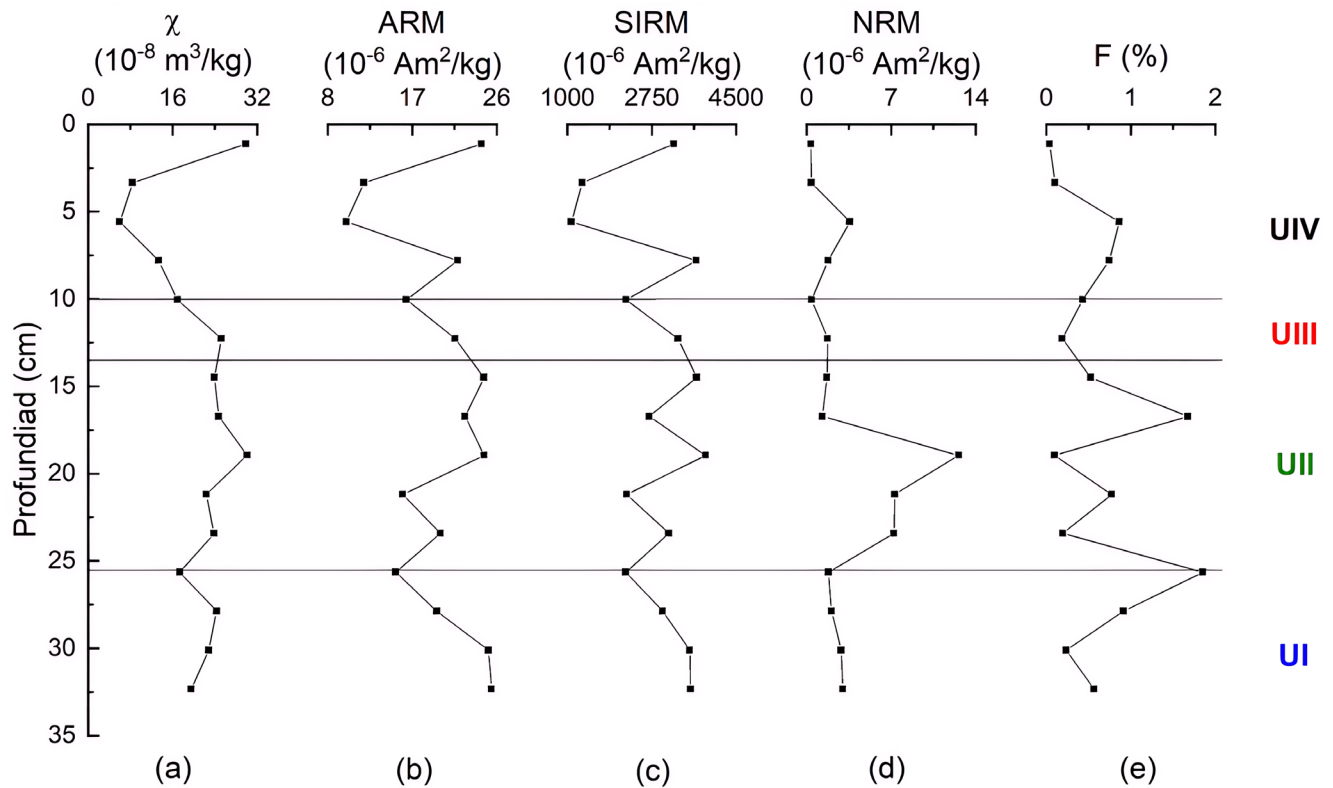


Figura 4 Registros de (a)  $\chi$ , (b) ARM, (c) SIRM, (d) NRM y (e) F (%) en función de la profundidad para el testigo LAZ2. Las líneas negras indican los límites entre las diferentes unidades litológicas.

sedimentos.

El testigo LAZ3 (Figura 2b) está conformado por arcillas y una menor proporción de materia orgánica que en el testigo LAZ2. El nivel más blanco que se observa en la foto corresponde a un nivel con mayor tamaño de grano, en el que predomina una textura limo-arcillosa.

### 3.2. CORRELACIÓN DE LOS TESTIGOS

Las variaciones de  $k$  en ambos testigos se utilizaron para correlacionarlos. En la Figura 3 los puntos de unión están marcados con líneas punteadas. Por otro lado, la intensidad de  $k$  para el testigo LAZ3 es menor que el testigo LAZ2. Esta diferencia es coincidente con la litología ya que LAZ2 presenta mayor proporción de arenas. Además, esta correlación indicaría una diferencia en el ritmo de

sedimentación de los testigos que podría deberse a que los testigos fueron extraídos de distintos sitios de la laguna.

El testigo LAZ2 presenta en general un mayor tamaño de grano (tipo siliciclásticos) que el testigo LAZ3 si comparamos sus descripciones litológicas. Se observa que, cercano al sitio de extracción de LAZ2, se encuentra una zona de escurrimiento de la laguna, por lo que es esperable que el testigo se encuentre bajo un ambiente de mayor energía que el testigo LAZ3.

### 3.3. MAGNETISMO DE ROCAS

Los registros de  $k$ , NRM, ARM y SIRM del testigo LAZ2, junto a las unidades litológicas (UI, UII, UIII y UIV) se muestran en la Figura 4. Los registros de  $k$ , ARM y SIRM muestran en general

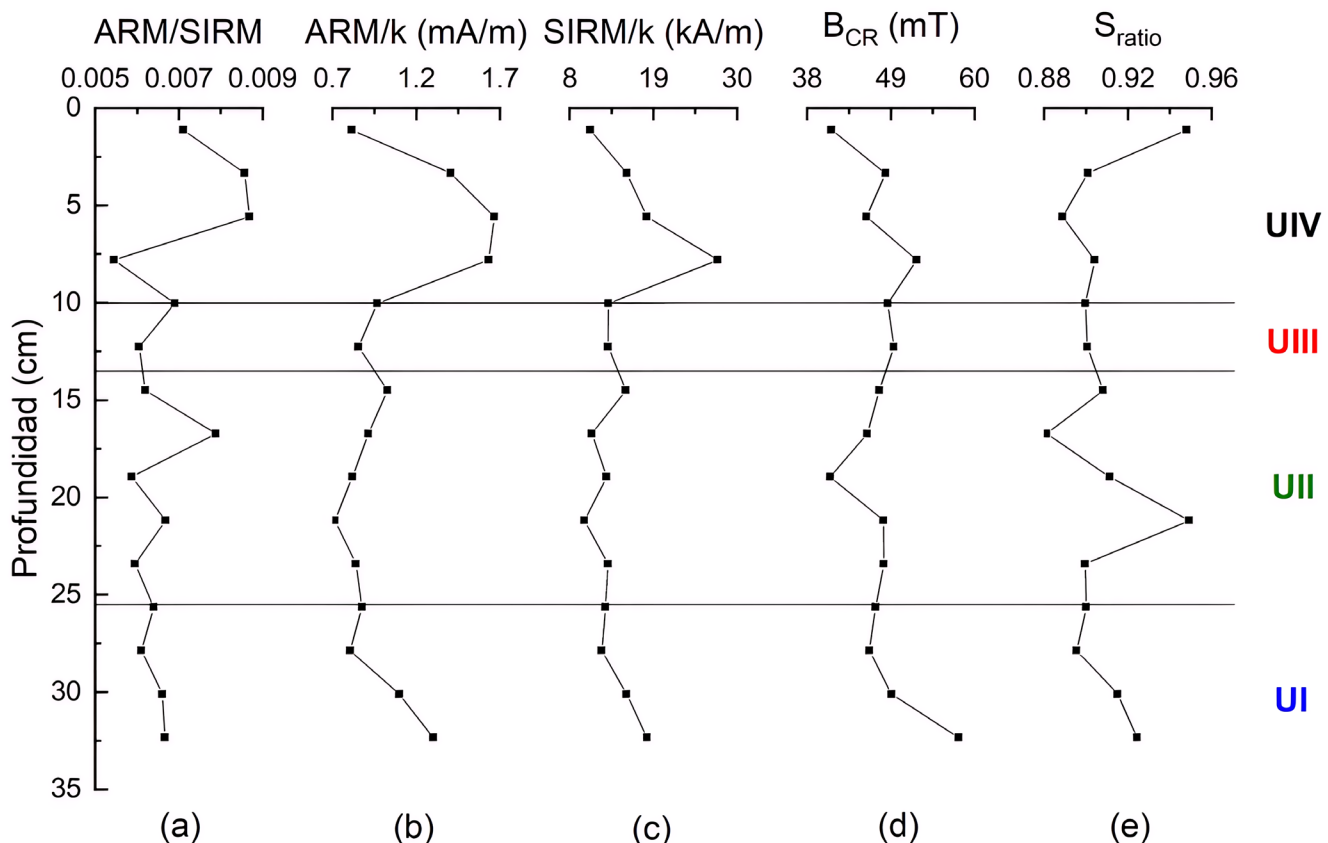


Figura 5 Registros de (a) ARM/SIRM, (b) ARM/k, (c) SIRM/k, (d)  $B_{CR}$  y (e)  $S_{ratio}$  en función de la profundidad. Las líneas negras indican los límites entre las diferentes unidades litológicas.

variaciones con correspondencia en picos y valles. La NRM presenta un comportamiento diferenciado a las otras magnetizaciones y  $k$ , sobre todo en la UII. Esto puede deberse a que la NRM en las muestras de esta unidad esté dominada por alguna magnetización viscosa.

Los cocientes indicadores de las variaciones de tamaño de grano magnético, ARM/SIRM, ARM/ $k$  y SIRM/ $k$  (Figura 5a-5c), muestran una tendencia decreciente hacia el tope en UI, y un comportamiento constante en UII y UIII, lo que indica un aumento del tamaño de grano magnético desde la base del testigo hasta los 25 cm, que luego se mantiene sin grandes variaciones hasta los 10 cm. En UIV se observa una notoria disminución en el tamaño de grano respecto a las unidades anteriores. Este comportamiento también se observa en el gráfico SIRM vs  $k$  (Figura 6a), donde además se evidencia una menor concentración magnética en UIV en comparación con las otras unidades, excepto en la muestra ubicada en el tope, que presenta un importante incremento (Figura 4).

Esta diferencia es notable en todos los parámetros asociados a las variaciones de la concentración magnética y coincide con un crecimiento abrupto del LOI (Figura 2a). El factor de susceptibilidad

dependiente de la frecuencia ( $F$ ) es inferior al 2% para todas las muestras (Figura 4e), lo que indicaría que no hay presencia importante de partículas superparamagnéticas en el testigo. Los valores de  $S_{ratio}$  y  $B_{CR}$  (Figura 5d - 5e) varían en los rangos 0.88-0.95 y 41.0-57.9 mT, respectivamente, indicando la presencia mayoritaria de minerales magnéticamente blandos como magnetita, (titano) magnetita y/o maghemita (Turner, 1997). El registro SIRM/ $k$  vs.  $B_{1/2}$  (Peters y Dekkers, 2003) también sugiere que la mineralogía magnética es magnetita, (titano)magnetita y/o maghemita (Figura 6b).

Las curvas de histéresis muestran un comportamiento que indica la presencia dominante de minerales ferrimagnéticos (Fig. 7 a-b). Los componentes dia/paramagnéticos de la susceptibilidad se pueden determinar ajustando una pendiente a través de la rama descendente del ciclo de histéresis en el intervalo [400-500] mT. Podemos identificar si esta parte del ciclo está influenciado por minerales magnéticos de alta coercitividad, si la curva de histéresis inicial no se solapa con la rama descendente del ciclo en ese rango de campos (Kosareva *et al.*, 2015).

Las muestras 10 y 15 (Figura 7a, 7b respectivamente) son representativas del comportamiento de

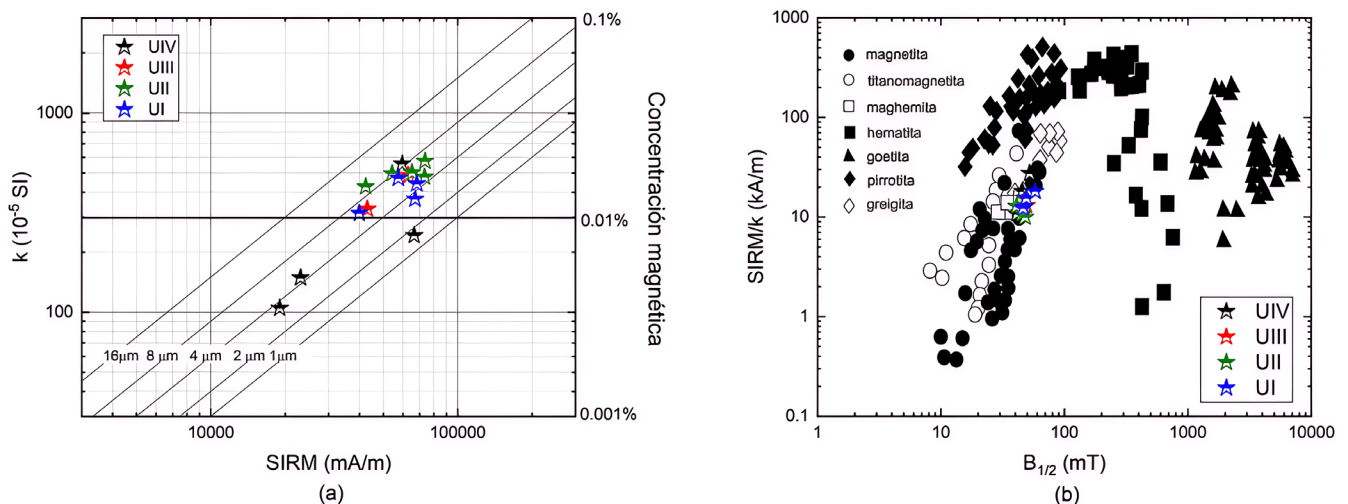


Figura 6 Biplots de a) SIRM vs.  $k$  (Thompson y Oldfield, 1986) y b) SIRM/ $k$  vs.  $B_{1/2}$  (Peters y Dekkers, 2003) como indicador de la mineralogía magnética.

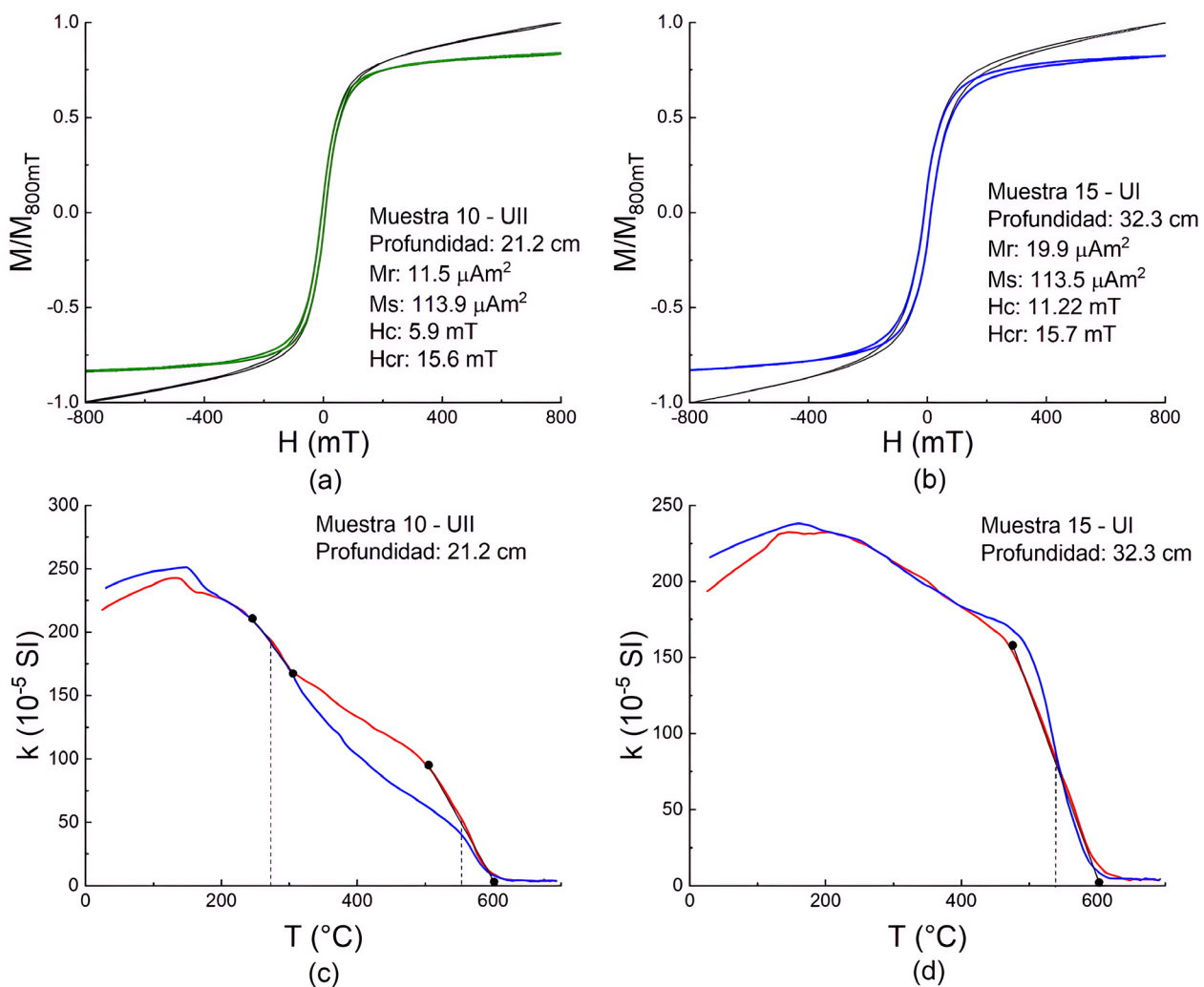


todas las muestras analizadas y presentan ciclos de histéresis simétricos (calculados tras la corrección día y paramagnética), lo que apunta a que los conjuntos de partículas son de dominio pseudo-simple (DPS, por sus siglas en inglés) ya que muestran valores similares cerca del origen (Dunlop, 2002).

Las curvas de calentamiento y enfriamiento  $k$  vs  $T$  se muestran en la Figura 7c y 7d. El parámetro  $k$  decae en un rango de temperaturas (marcado con una recta en cada gráfico en la figura) por lo que se estimó la temperatura de Curie a partir del valor medio con un intervalo de confianza asociado al

rango de temperaturas (Prévot *et al.*, 1983). Se analizó una muestra de cada unidad sedimentaria.

Las muestras de las unidades UII, UIII y UIV presentaron un comportamiento similar al de la Figura 7c, con dos fases termomagnéticas con temperaturas de Curie cercanas a los  $265 \pm 35$  °C y  $550 \pm 50$  °C (Figura 7c). Este tipo de comportamiento sugiere la presencia combinada de diferentes tipos de (titano)magnetita, presentando una componente principal con una baja proporción de titanio (temperatura de Curie cercana a la de la magnetita) y una componente secundaria con



**Figura 7** Ciclos de histéresis de las muestras (a) 10 (UII) y (b) 15 (UI) del testigo LAZ2. Curva verde (a) y azul (b): sin la contribución día/paramagnética. Curvas  $k$  vs  $T$  para las muestras (a) 10 (UII) y (d) 15 (UI) del testigo LAZ2. Las líneas rojas (c-d) representan el comportamiento de  $k$  durante el calentamiento y las azules (c-d) durante el enfriamiento.

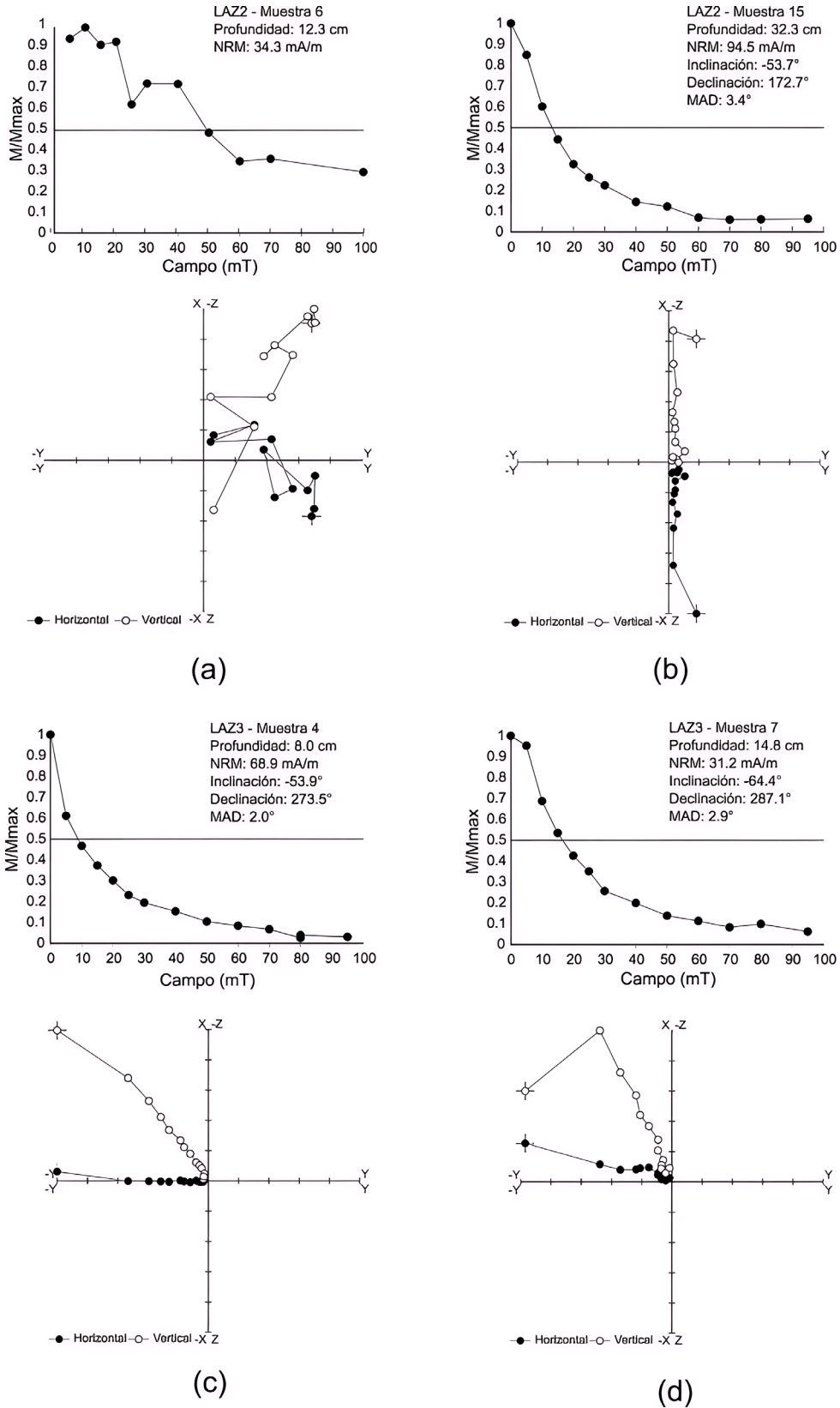


Figura 8 Diagramas de vectores ortogonales y curvas de desmagnetización para dos muestras representativas de cada testigo..

una mayor proporción de titanio representativa de la temperatura de Curie más baja (Dunlop y Özdemir, 1997).

Las muestras de la unidad UI (Figura 7d) presentan una sola fase termomagnética con una temperatura de Curie cercana a los  $530 \pm 70$  °C lo que sugiere la presencia de (titano)magnetita con baja proporción de titanio (Dunlop y Özdemir, 1997).

#### 4. Resultados paleomagnéticos

La Figura 8 muestra los diagramas de desmagnetización por campos alternos decrecientes de dos muestras de cada uno de los testigos analizados.

Las muestras sobre la base de LAZ2 (UI) se caracterizan por tener una NRM mono componente que se aísla después de eliminar una componente viscosa de baja coercitividad a los 10 mT. La dirección paleomagnética permanece estable hasta los 60 mT (campo al que la magnetización es cercana al 10% de la NRM) para las muestras de UI en LAZ2 y las muestras de LAZ3. Los vectores de desmagnetización muestran trayectorias lineales hacia el origen en los diagramas vectoriales ortogonales (Figura 8b-8d). No ocurre lo mismo para las muestras de UII, UIII y UIV del testigo LAZ2 donde algunas de las muestras no tienen una desmagnetización estable y otras presentan un grado alto de viscosidad (Figura 8a). Por este motivo sólo 4 muestras de la base del testigo pudieron ser analizadas para obtener datos direccionales.

Para futuros trabajos paleomagnéticos en la laguna se recomienda como sitio de extracción la región norte de la laguna, en algún punto cercano al sitio LAZ3 ya que el área cercana al sitio LAZ2 presenta un ambiente de mayor energía.

Se calculó la inclinación y declinación magnética (I y D, respectivamente) de la magnetización remanente primaria y la Desviación Angular Máxima (MAD, por sus siglas en inglés) en las muestras a partir del análisis de componentes principales (Kirschvink, 1980) utilizando Remasoft 3.0

(Chadima and Hrouda, 2006).

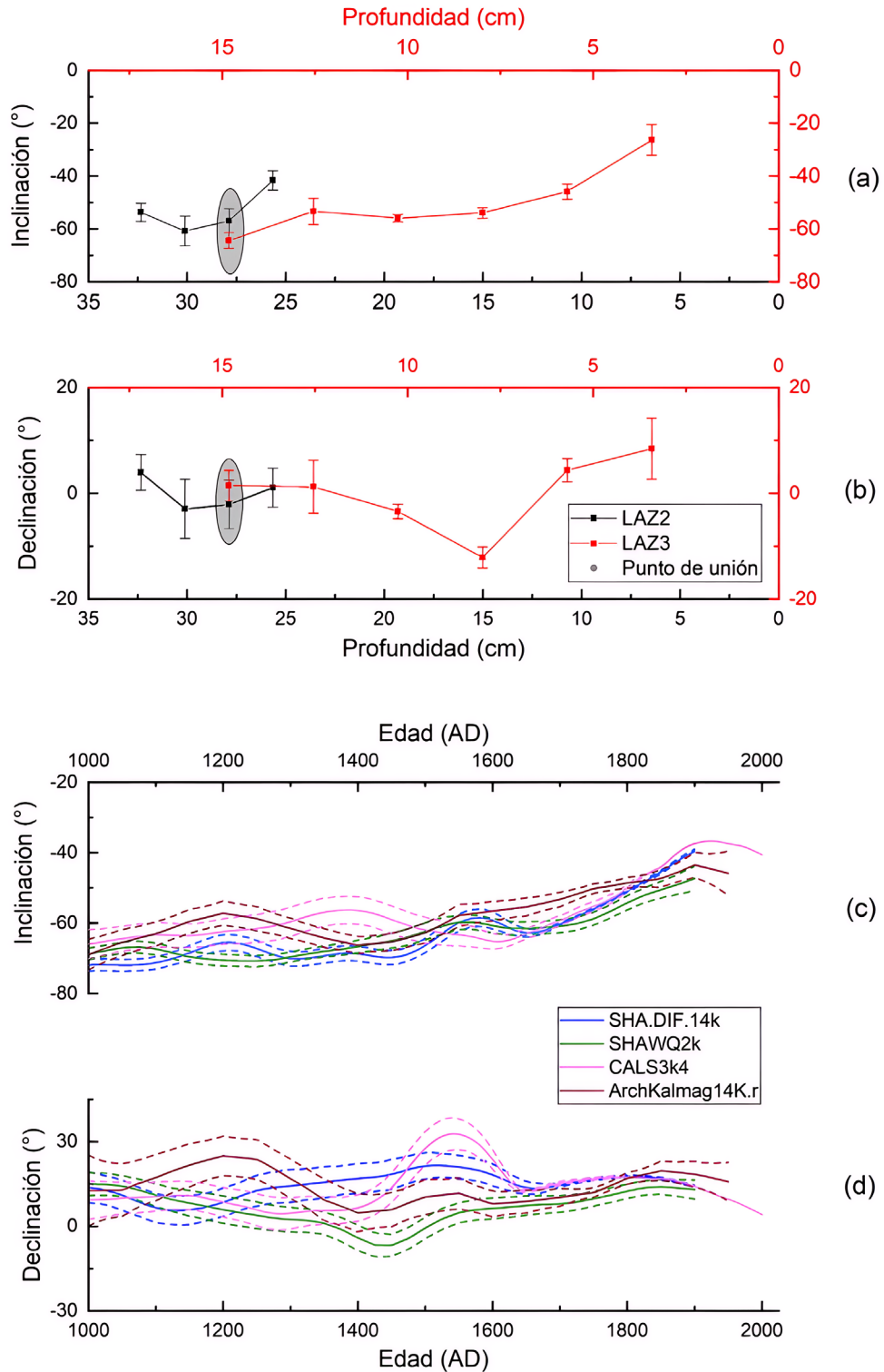
Dado que los testigos no estaban orientados con respecto al norte magnético, los valores de declinación se centraron en torno a 0°, después de haber restado la declinación media de todo el testigo en cada caso. Las inclinaciones varían entre -60.8° y -41.6° para las muestras de UI de LAZ2 y -64.4° y -26.3° para LAZ3. Los registros muestran variaciones en torno a la inclinación esperada, según el modelo del dipolo geocéntrico axial (GAD, por sus siglas en inglés) en el sitio de estudio, que es de -60.1° (McElhinny y McFadden, 1999) lo que sugiere el potencial del sitio para realizar estudios paleomagnéticos.

En la Figura 9a y 9b se muestran los registros de inclinación (I) y declinación (D) de ambos testigos. Además, se muestra con un óvalo gris el punto de unión entre los dos testigos correlacionado mediante sus perfiles de k (Figura 2). Aunque no pueden analizarse las variaciones seculares del testigo LAZ2 porque contar sólo 4 muestras con direcciones confiables, se observa que para esas muestras y tomando la correlación por k, hay coincidencias de los valores de inclinación y declinación.

En la Figura 9c y 9d, se incluyen los registros de inclinación y declinación de los modelos geomagnéticos globales ArchKalmag14K.r (Schanner *et al.*, 2022), CALS.3k4 (Korte *et al.*, 2009), SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014), y SHAWQ2k (Campuzano *et al.*, 2019) calculados para el último milenio en el sitio de estudio. Las variaciones de inclinación del registro LAZ3 muestran una tendencia general similar con los modelos pero es más difícil realizar una comparación del registro de declinación ya que los modelos presentan diferencias entre sí.

Cabe mencionar que la diferencia entre la media de la declinación de los modelos (cercana a 15°C) y la de los registros de laguna Azul, se debe a que las variaciones se centraron 0°.

La comparación con los modelos remarca la importancia de este sitio de estudio como fuente de datos valiosos para ajustar los modelos globales de campo geomagnético.



**Figura 9** Registros de (a) inclinación y (b) declinación de los testigos LAZ2 (negro) y LAZ3 (rojo). Con un óvalo gris se muestra el punto de unión entre los dos testigos correlacionado mediante sus perfiles de k (Figura 2). Registros de (c) inclinación y (d) declinación de los modelos geomagnéticos globales ArchKalmag14K.r (Schanner *et al.*, 2022), CALS.3k4 (Korte *et al.*, 2009), SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014), y SHAWQ2k (Campuzano *et al.*, 2019) calculados para el último milenio en el sitio de estudio.

#### 4.1. MARCADOR CRONOESTRATIGRÁFICO

Hasta el momento no se cuenta con dataciones por radioisótopos de los registros sedimentarios de Laguna Azul. Córdoba *et al.* (2017) realizó un estudio en diferentes registros de la Región Pampeana Argentina donde encontró un marcador estratigráfico en  $1980 \pm 2$  AD y que corresponde a un nivel rico en carbono orgánico que coincide con el aumento del nivel lacustre más notable ocurrido durante el siglo XX. Dicho indicador es observado en registros instrumentales y paleolimnológicos en el centro de Argentina y fue asociado con el fenómeno del Niño-Oscilación Sur (ENOS).

Este marcador cronoestratigráfico fue detectado a los 7 cm en el testigo LAZ2, donde se observa un aumento repentino de LOI (Figura 2a), y es de utilidad para dar un primer paso hacia el contexto temporal de este registro, obteniéndose así un ritmo de sedimentación de 1.66 mm/año aproximadamente para esa sección del testigo.

#### 4.1. ANÁLISIS PALEOAMBIENTAL POR UNIDAD SEDIMENTARIA DEL TESTIGO LAZ2

La unidad UI se caracteriza por una proporción de materia orgánica estable y baja indicando que la productividad lacustre fue escasa (Figura 2a). Los valores de k, ARM y SIRM mayores a la media del testigo sugieren que el ingreso de material detrítico fue alto (Figura 4). Los cocientes indicadores de tamaño de grano magnético ARM/SIRM, ARM/k y SIRM/k, presentan valores mayores a la media indicando un tamaño de grano más pequeño (Figura 5). Además, la descripción litológica indica la presencia de limos arcillosos en esta unidad, con el tamaño de grano más fino del perfil. Las muestras de esta unidad se caracterizan por una desmagnetización de la NRM estable indicando que el ambiente en el que se depositaron los sedimentos fue suficientemente estable (tal vez con un nivel de la laguna mayor que en las unidades suprayacentes) lo que permitió registrar la magnetización del campo magnético terrestre. Aunque esta no es la única condición para obtener datos paleomagnéticos de calidad,

ya que también influyen la mineralogía y tamaño de grano magnético, es una condición necesaria (Tauxe, 1993).

Las unidades UII y UIII que se caracterizan por presentar los valores más bajos de LOI, más altos de k, ARM y SIRM, y el tamaño de grano magnético más grande del perfil (Figura 2a, 4, 5). Coincidentemente, estas unidades están compuestas por los tamaños de grano más gruesos según la litología, limos arenosos y arenas finas y medias (Figura 2b). Además, se caracterizan por no haber grabado bien la NRM lo que podría estar relacionado con un menor nivel del lago y un ambiente de mayor energía para ese período (Figura 8a).

Por último, la unidad UIV representa el período más reciente y se distingue por presentar valores altos de LOI en comparación con el resto del perfil (Figura 2a). Además, exhibe los valores más bajos de k, ARM y SIRM, y al mismo tiempo algunas de las muestras presentan un tamaño de grano magnético notablemente más pequeño que el resto del perfil (Figura 4, 5). Las características de este período parecen estar asociadas a un cambio ambiental hacia condiciones de menor llegada de material detrítico y un aumento de la productividad en la laguna (*e.g.*, Achaga *et al.*, 2022; Das *et al.*, 2008; Moreno *et al.*, 2007; Talbot y Livingstone, 1989).

## 5. Conclusiones

Se presentan resultados paleomagnéticos y de magnetismo de rocas en dos testigos cortos de la laguna Azul de la meseta de Somuncurá en Argentina. Se identificaron cuatro unidades sedimentarias en el testigo LAZ2 y una en el testigo LAZ3. En general en el testigo LAZ2 se encontró un mayor tamaño de grano (siliciclásticos) que en LAZ3. La estimación del contenido de materia orgánica a través de la medición de LOI permitió encontrar un marcador cronoestratigráfico en el testigo LAZ2. Las mediciones de inclinación y declinación magnética permitieron la obtención de datos direccionales en ambos testigos, aunque en el



testigo LAZ2 solo fue posible para las muestras de UI. Estos datos fueron contrastados con los modelos geomagnéticos globales ArchKalmag14K.r (Schanner *et al.*, 2022), CALS.3k4 (Korte *et al.*, 2009), SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014), y SHAWQ2k (Campuzano *et al.*, 2019) mostrando características similares para los registros de inclinación. Al mismo tiempo se observó que los modelos presentan diferencias entre sí para el sitio de estudio durante el último milenio, lo que remarca la importancia de continuar realizando estudios paleomagnéticos en esta región.

El análisis de magnetismo de rocas sobre LAZ2 reveló la presencia de (titano) magnetita, así como variaciones en el tamaño de grano magnético a lo largo del perfil que se ajustan bien a los cambios litológicos y permitieron hacer un análisis preliminar de las posibles variaciones paleoambientales en la Laguna Azul. Este estudio preliminar se destaca por ser pionero en la meseta de Somuncurá, Argentina.

## Contribuciones de los autores

(1) Conceptualización: RVA, CGSG, MAI, AG; (2) Análisis o adquisición de datos: RVA; (3) Desarrollo metodológico/técnico: RVA; (4) Redacción del manuscrito original: RVA, CG, MAI, AG; (5) Diseño gráfico: RVA; (6) Trabajo de campo: RVA; (7) interpretación: RVA, MAI, CGSG.

## Financiamiento

Las mediciones de los parámetros magnéticos se realizaron en el Institute de Physique du Globe de Paris gracias a una beca Saint Exupéry financiada por Campus France y el Ministerio de Educación Argentino.

## Agradecimientos

Queremos dar las gracias a la Fundación Somuncurá por hospedarnos en su casa de Valcheta durante el muestreo. También al técnico

Claudio Santiago y a Silvina Delgado por su asistencia en la campaña de muestreo, y al técnico geólogo Patricio Andrade por sus aportes a este trabajo. Queremos dar las gracias a la Dra. France Lagroix, Dr. Yohan Guyodo y Adriana González por su ayuda en el laboratorio del IPGP. Por último, los autores queremos agradecer a la Dra. Grasiene Luz Mathias y a la Dra. Maria Luisa Osete por ayudar a mejorar este artículo con sus sugerencias y comentarios. AG agradece el apoyo de proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT n° IN100224.

## Conflicto de interés

Los autores hacen constar que no existen conflictos de interés con otros autores, instituciones u otros terceros sobre el contenido (total o en parte) del artículo.

## Editora a cargo

Milagrosa Aldana

## Referencias

- Achaga, R.V., Gogorza, C., Irurzun, M.A., Goguitchaichvili, A., Mestelán, S., Ruiz Fernández, A. C., Sánchez Cabeza, J.A., Sánchez Bettucci, L., Sinito, A., Morales, J., Martínez, D., 2022, Monitoring the environmental evolution and its relationship with anthropogenic activities using magnetic and geochemical proxies on Lake Melincué sediments: *Journal of South American Earth Sciences*, 116, 103827. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103827>
- Aguilera, E.Y., 2005, Identificación y distribución de distintas superficies geomorfológicas de escaso relieve local, por medio de sensores remotos en el área del macizo Nordpatagónico, provincia de Río Negro: República de Argentina, Universidad Nacional de La Plata, tesis doctoral. <https://doi.org/10.35537/10915/4513>
- Brown, M.C., Donadini, F., Nilsson, A., Panovska,

- S., Frank, U., Korhonen, K., Schuberth, M., Korte, M., Constable, C.G., 2015, GEOMAGIA50.v3: 2. A new paleomagnetic database for lake and marine sediments: *Earth, Planets and Space*, 67(1), article 70. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0233-z>
- Campuzano, S.A., Gómez-Paccard, M., Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., 2019, Emergence and evolution of the South Atlantic Anomaly revealed by the new paleomagnetic reconstruction SHAWQ2k: *Earth and Planetary Science Letters*, 512, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.01.050>
- Chadima, M., Hrouda, F., 2006, Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer. *Travaux Géophysiques*, 27, 20.
- Córdoba, F.E., Piovano, E.L., Guerra, L., Mulrow, S., Sylvestre, F., Zárate, M., 2017, Independent time markers validate 210Pb chronologies for two shallow Argentine lakes in Southern Pampas: *Quaternary International*, 438(Part A), 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.07.003>
- Das, S.K., Routh, J., Roychoudhury, A.N., 2008, Sources and historic changes in polycyclic aromatic hydrocarbon input in a shallow lake, Zeekoevlei, South Africa: *Organic Geochemistry*, 39(8), 1109-1112. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.04.005>
- Dunlop, D.J., 2002, Theory and application of the Dayplot ( $M_{rs}/M_s$  versus  $H_{cr}/H_c$ ) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B3), EPM 4-1-EPM 4-22. <https://doi.org/10.1029/2001JB000486>
- Dunlop, D.J., Özdemir, Ö., 1997, *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*: Cambridge, Cambridge University Press, 573 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794>
- Finlay, C.C., Aubert, J., Gillet, N., 2016, Gyre-driven decay of the Earth's magnetic dipole: *Nature Communications*, 7(1), 10422. <https://doi.org/10.1038/ncomms10422>
- Franchi, M., Ardolino, A.A., Remesal, M., Caba, R., Dalponte, M.R., Lizuaín, A., 2001, Hoja Geológica 4166-III, Cona Niyeu, Provincia de Río Negro 1:250.000: Buenos Aires, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 262, 1 mapa con texto, disponible en <<https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/108>>.
- Geiss, C.E., Banerjee, S.K., Camill, P., Umbanhowar, C.E., 2004, Sediment-magnetic signature of land-use and drought as recorded in lake sediment from south-central Minnesota, USA: *Quaternary Research*, 62(2), 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.06.009>
- Gogorza, C.S.G., Lirio, J.M., Nuñez, H., Chaparro, M., Bertorello, H.R., Sinito, A.M., 2004, Paleointensity studies on Holocene-Pleistocene sediments from lake Escondido, Argentina: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 145(1-4), 219-238. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.03.010>
- Gogorza, C.S.G., Irurzun, M.A., Chaparro, M.A.E., Lirio, J.M., Nunez, H., Bercoff, P.G., Sinito, A.M., 2006, Relative paleointensity of the geomagnetic field over the last 21,000 years BP from sediment cores, Lake El Trébol (Patagonia, Argentina): *Earth, Planets and Space*, 58(10), 1323-1332. <https://doi.org/10.1186/BF03352628>
- Gogorza, C.S.G., Sinito, A.M., Ohlendorf, C., Kastner, S., Zolitschka, B., 2011, Paleosecular variation and paleointensity records for the last millennium from southern South America (Laguna Potrok Aike, Santa Cruz, Argentina): *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 184(1-2), 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2010.10.011>
- Gogorza, C.S.G., Irurzun, M.A., Sinito, A.M., Lisé-Pronovost, A., St-Onge, G., Haberzettl, T., Ohlendorf, C., Kastner, S., Zolitschka, B., 2012, High-resolution paleomagnetic records from Laguna Potrok Aike (Patagonia, Argentina) for the last 16,000 years: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(12), 1-18. <https://doi.org/10.1029/2011JG001801>

- org/10.1029/2011GC003900
- Gogorza, C.S.G., Page, C.A., Goguitchaichvili, A., Greco Mainero, M.C., Morales, J., Rapalini, A. E., 2017, Aportes a la cronología absoluta de la estancia jesuítica de Alta Gracia (Córdoba, Argentina): Estudio arqueomagnético de la baldosa de la Parroquia Nuestra Señora de la Merced: *Arqueología iberoamericana*, 35, 29-36. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1319744>
- Gogorza, C.S.G., Irurzun, M.A., Orgeira, M.J., Palermo, P., Llera, M., 2018a, A continuous Late Holocene paleosecular variation record from Carmen Lake (Tierra del Fuego, Argentina): *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 280, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2018.04.006>
- Gogorza, C.S.G., Irurzun, M.A., Heider, G., Goguitchaichvili, A., Ojeda, G., Chiesa, J., Greco, C., 2021, Dating of Holocene fluvial deposits in the southern Sierras Pampeanas (Argentina) by matching paleomagnetic secular variation to a geomagnetic field model: *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 102996. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102996>
- Goguitchaichvili, A., Greco, C., Garcia Ruiz, R., Pereyra Domingorena, L., Cejudo, R., Morales, J., Gogorza, C., Scattolin, C., Tarragó, M., 2019, First archaeointensity reference paleosecular variation curve for South America and its implications for geomagnetism and archaeology: *Quaternary Research*, 92(1), 81-97. <https://doi.org/10.1017/qua.2018.119>
- Goguitchaichvili, A., García-Ruiz, R., Greco, C., Kravchinsky, V., Rodríguez, N.P., Morales, J., Berkovich, C., 2023, Evolution of the Earth's magnetic field strength in northwestern Argentina during the last two millennia: Towards the improvement of south American geomagnetic paleosecular variation curve: *Journal of South American Earth Sciences*, 126, 104357. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104357>
- Hartmann, G.A., Pacca, I.G., 2009, Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 81(2), 243-255. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652009000200010>
- Irurzun, M.A., Gogorza, C.S.G., Chaparro, M.A.E., Lirio, J.M., Nuñez, H., Vilas, J.F., Sinito, A.M., 2006, Paleosecular variations recorded by Holocene-Pleistocene sediments from Lake El Trébol (Patagonia, Argentina): *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 154(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2005.06.012>
- Irurzun, M.A., Gogorza, C.S.G., Torcida, S., Lirio, J.M., Nuñez, H., Bercoff, P.G., Chaparro, M. A.E., Sinito, A.M., 2009, Rock magnetic properties and relative paleointensity stack between 13 and 24kyr BP calibrated ages from sediment cores, Lake Moreno (Patagonia, Argentina): *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 172(3-4), 157-168. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.08.018>
- Irurzun, M.A., Gogorza, C.S.G., Sinito, A.M., Chaparro, M.A.E., Prieto, A.R., Laprida, C., Lirio, J.M., Navas, A.M., Nuñez, H., 2014, A high-resolution palaeoclimate record for the last 4800 years from lake la Brava, SE pampas plains, Argentina: *Geofísica Internacional*, 53(4), 365-383. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)70072-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(14)70072-8)
- Irurzun, M.A., Chaparro, M.A.E., Sinito, A.M., Gogorza, C.S.G., Nuñez, H., Nowaczyk, N.R., Böhnell, H.N., 2017, Relative palaeointensity and reservoir effect on Lake Esmeralda, Antarctica: *Antarctic Science*, 29(4), 356-368. <https://doi.org/10.1017/S0954102017000050>
- Kirschvink, J.L., 1980, The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data: *Geophysical Journal International*, 62(3), 699-718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>
- Korte, M., Donadini, F., Constable, C.G., 2009, Geomagnetic field for 0–3 ka: 2. A new series of time-varying global models: *Geochemistry*,

- Geophysics, Geosystems, 10(6), 1-24. <https://doi.org/10.1029/2008GC002297>
- Kosareva, L.R., Utemov, E.V., Nurgaliev, D.K., Shcherbakov, V.P., Kosarev, V.E., Yasonov, P.G., 2015, Separation of ferromagnetic components by analyzing the hysteresis loops of remanent magnetization: *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 51(5), 689-708. <https://doi.org/10.1134/S1069351315050079>
- Lisé-Pronovost, A., St-Onge, G., Gogorza, C., Jouve, G., Francus, P., Zolitschka, B., the PASADO Science Team, 2014, Rock-magnetic signature of precipitation and extreme runoff events in south-eastern Patagonia since 51,200 cal BP from the sediments of Laguna Potrok Aike: *Quaternary Science Reviews*, 98, 110-125. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.05.029>
- Lisé-Pronovost, A., St-Onge, G., Gogorza, C., Habertzettl, T., Jouve, G., Francus, P., Ohlendorf, C., Gebhardt, C., Zolitschka, B., PASADO Science Team, 2015, Rock-magnetic proxies of wind intensity and dust since 51,200 cal BP from lacustrine sediments of Laguna Potrok Aike, southeastern Patagonia: *Earth and Planetary Science Letters*, 411, 72-86. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.11.007>
- Lynch, V., Terranova, E., 2019, A traceological approach to the use of Laguna Azul during the Late Holocene (from ca. 2000 years BP) in Norpatagonia, Argentina: *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11(8), 4157-4169. <https://doi.org/10.1007/s12520-019-00806-7>
- Maher, B.A., Thompson, R., 1999, *Quaternary climates, environments, and magnetism*: Cambridge, Cambridge University Press, 402 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535635>
- Maro, G., Remesal, M.B., 2012, El volcanismo bimodal del volcán cerro corona, Alta Sierra De Somún Curá (Provincia de Río Negro) [Bimodal volcanism of the cerro Corona volcano in the Alta Sierra de Somún Curá (Río Negro province)]: *Revista de la Asociación Geologica Argentina*, 69(1), 142-151.
- Masera, R., 1998, La meseta patagónica de Somuncurá. Un horizonte en movimiento [The Patagonian plateau of Sumuncura. A moving horizon]: Viedma: Gobierno de la Provincia de Chubut–Gobierno de la Provincia de Río Negro, 480 p.
- McElhinny, M.W., McFadden, P.L., 1999, *Paleomagnetism: Continents and Oceans*: San Diego, USA: Academic Press, 588 p.
- Moreno, A., Giralt, S., Valero-Garcés, B., Sáez, A., Bao, R., Prego, R., Pueyo, J. J., González-Sampériz, P., Taberner, C., 2007, A 14kyr record of the tropical Andes: The Lago Chungará sequence (18°S, northern Chilean Altiplano): *Quaternary International*, 161(1), 4-21. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.10.020>
- Palermo, P., Irurzun, M.A., Gogorza, C.S.G., Sinito, A.M., Ohlendorf, C., Zolitschka, B., 2019, Rock-magnetic and paleomagnetic studies on late-Holocene sediments from Laguna Cháltel (Patagonia, Argentina): *Journal of South American Earth Sciences*, 90, 204-215. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.11.028>
- Pavón-Carrasco, F.J., De Santis, A., 2016, The South Atlantic Anomaly: The Key for a Possible Geomagnetic Reversal: *Frontiers in Earth Science*, 4, 40. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2016.00040>
- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M., De Santis, A., 2014, A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data: *Earth and Planetary Science Letters*, 388, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.046>
- Peters, C., Dekkers, M.J., 2003, Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(16), 659-667. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00120-7)



- Poletti, W., Trindade, R.I.F., Hartmann, G.A., Damiani, N., Rech, R.M., 2016, Archaeomagnetism of Jesuit Missions in South Brazil (1657–1706 AD) and assessment of the South American database: *Earth and Planetary Science Letters*, 445, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.04.006>
- Prevot, M., Mankinen, E.A., Gromme, S., Lecaillie, A., 1983, High Paleointensities of the Geomagnetic-Field from Thermomagnetic Studies on Rift-Valley Pillow Basalts from the Mid-Atlantic Ridge: *Journal of Geophysical Research* 88(B3): 2316-2326. <https://doi.org/10.1029/JB088iB03p02316>
- Recasens, C., Ariztegui, D., Gebhardt, C., Gogorza, C., Haberzettl, T., Hahn, A., Kliem, P., Lisé-Pronovost, A., Lücke, A., Maidana, N., Mayr, C., Ohlendorf, C., Schäbitz, F., St-Onge, G., Wille, M., Zolitschka, B., Team Science, 2012, New insights into paleoenvironmental changes in Laguna Potrok Aike, southern Patagonia, since the Late Pleistocene: The PASADO multiproxy record: *The Holocene*, 22(11), 1323-1335. <https://doi.org/10.1177/0959683611429833>
- Roperch, P., Chauvin, A., Lara, L.E., Moreno, H., 2015, Secular variation of the Earth's magnetic field and application to paleomagnetic dating of historical lava flows in Chile: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 242, 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.03.005>
- Schaner, M., Korte, M., Holschneider, M., 2022, ArchKalmag14k: A Kalman-Filter Based Global Geomagnetic Model for the Holocene: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2), e2021JB023166. <https://doi.org/10.1029/2021JB023166>
- Talbot, M.R., Livingstone, D.A., 1989, Hydrogen index and carbon isotopes of lacustrine organic matter as lake level indicators: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 70(1-3), 121-137. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(89\)90084-9](https://doi.org/10.1016/0031-0182(89)90084-9)
- Tarduno, J.A., Watkeys, M.K., Huffman, T.N., Cottrell, R.D., Blackman, E.G., Wendt, A., Scribner, C.A., Wagner, C.L., 2015, Antiquity of the South Atlantic Anomaly and evidence for top-down control on the geodynamo: *Nature Communications*, 6(1), 7865. <https://doi.org/10.1038/ncomms8865>
- Tauxe, L., 1993, Sedimentary records of relative paleointensity of the geomagnetic field: Theory and practice: *Reviews of Geophysics*, 31(3), 319-354. <https://doi.org/10.1029/93RG01771>
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986, Magnetic properties of natural materials, en Thompson, R., Oldfield, F., (eds.), *Environmental Magnetism: Netherlands*, Springer, 21-38. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-8036-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-011-8036-8_4)
- Trindade, R.I.F., Jaqueto, P., Terra-Nova, F., Brandt, D., Hartmann, G.A., Feinberg, J.M., Strauss, B.E., Novello, V.F., Cruz, F.W., Karmann, I., Cheng, H., Edwards, R.L., 2018, Speleothem record of geomagnetic South Atlantic Anomaly recurrence: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(52), 13198-13203. <https://doi.org/10.1073/pnas.1809197115>
- Turner, G.M., 1997, Environmental magnetism and magnetic correlation of high resolution lake sediment records from Northern Hawke's Bay, New Zealand: *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 40(3), 287-298. <https://doi.org/10.1080/00288306.1997.9514761>
- Walter, E.D., 1974, Determination of Carbonate and Organic Matter in Calcareous Sediments and Sedimentary Rocks by Loss on Ignition: Comparison With Other Methods: *Journal of Sedimentary Research*, 44(1), 242-248. <https://doi.org/10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D>