

EL USO DE PARÁMETROS MAGNÉTICOS EN ESTUDIOS PALEOLIMNOLÓGICOS EN ANTÁRTIDA

Marcos A.E. CHAPARRO¹, José D. GARGIULO¹, María A. IRURZUN¹, Mauro A.E. CHAPARRO^{1,2},
Karina L. LECOMTE³, Harald N. BÖHNEL⁴, Francisco E. CÓRDOBA⁵, Paula A. VIGNONI⁶,
Nadia T. MANOGRASSO CZALBOWSKI⁷, Juan M. LIRIO⁷, Norbert R. NOWACZYK⁸, Ana M. SINITO¹

¹ Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN) CONICET-UNCPBA, Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina. chaptor@exa.unicen.ed.ar

² Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNMDP, Mar del Plata, Argentina.

³ Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA), CONICET y Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, X5016GCA Córdoba, Argentina.

⁴ Centro de Geociencias (UNAM), Blvd. Juriquilla 3001, 76230 Querétaro, México.

⁵ Centro de Investigación y Transferencia de Jujuy (CIT-Jujuy) – CONICET, UNJu, Instituto de Geología y Minería, San Salvador de Jujuy, Argentina.

⁶ Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, X5016GCA Córdoba, Argentina.

⁷ Instituto Antártico Argentino (IAA), Buenos Aires, Argentina.

⁸ GeoForschungsZentrum Potsdam, Section 3.3, Telegrafenberg, D-14473, Potsdam, Germany.

Resumen: En esta contribución se describen las distintas técnicas y mediciones magnéticas utilizadas en Magnetismo Ambiental y Paleomagnetismo. Tales mediciones ofrecen útiles indicadores para realizar estudios relacionados con cambios climáticos y ambientales, así como herramientas de datación. Si bien es ampliamente conocida la utilidad de la susceptibilidad magnética, en primer lugar se discute el potencial y necesidad del uso de parámetros adicionales obtenidos a partir de mediciones de magnetizaciones remanentes (natural, anhistórica e isotérmica), histéresis magnética y estudios termomagnéticos. A continuación se presentan resultados magnéticos obtenidos en sedimentos lacustres del Archipiélago James Ross (NE de la Península Antártica) como un caso de estudio. Se complementa con estudios sedimentológicos, hidroquímicos, geoquímicos y de estadística multivariada, pero se pone énfasis en los parámetros magnéticos y su relación con los distintos procesos que ocurren en los sistemas lacustres antárticos. Se analiza además el uso de las paleointensidades relativas como herramienta de datación en lagunas antárticas.

Palabras clave: lagos, paleomagnetismo, Península Antártica, proxies magnéticos.

EXTENDED ABSTRACT

Magnetic parameters in paleolimnological studies in Antarctica

Environmental magnetism and paleomagnetism methods are useful tools for climate-related and environmental changes studies, as well as for

age dating. In particular, they may be applied in magnetic monitoring and to investigate the behavior, response, and history of environments like rivers, lakes, soils, etc. Although the usefulness of magnetic susceptibility in such applications is well known, in this contribution the potential and the need of using additional parameters obtained from measurements of remanent magnetization (natural,

anhysteretic, isothermal), magnetic hysteresis and thermomagnetic studies are discussed.

Magnetic signals from sediments and soils are often dominated by ferromagnetic minerals *sensu lato*: ferrimagnetic (titano)-magnetite and/or antiferromagnetic hematite. These minerals are often not detected with standard analytical techniques due to their low concentrations (<1% wt). However, rock magnetic measurements are sensitive enough to detect and identify such minerals, with concentrations that are several orders of magnitude smaller. One important phenomenon to be taken into account is “magnetic enhancement” (Le Borgne 1955, Tite and Linington, 1975), which is caused by the *in situ* conversion of paramagnetic to ferrimagnetic materials. New formation of ferrimagnetic materials may occur by fermentation, heating, fire, biological activity and chemical processes (Mullins, 1977; Maher, 1986), and thus also be the result of pollutants and magnetized particles of anthropogenic origin (Chaparro *et al.*, 2006, 2013a,b; Bućko *et al.*, 2010; Marié *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011).

Natural systems are complex and their behavior depends on the interaction of several independent forcing factors like climate variations and human activity affecting the environment. Parameters describing indirectly a system are called “proxies” and may be derived from physical, chemical or biological properties. Magnetic proxies have the advantage to be determined with high sensitivity combined with fast laboratory processing; sample preparation is easy, laboratory instruments are of relatively low cost, and most measurements are non-destructive. Magnetic properties are well suited as proxies of: a) magnetic mineral concentration; b) magnetic grain size; c) correlation of sediment cores and soil profiles; d) geomagnetic field records; e) climatic changes records; f) pollution records; and g) environmental processes records (Maher *et al.*, 1999; Kravchinsky *et al.*, 2003; Chaparro *et al.* 2006, 2007, 2013a,b, 2015; Irurzun *et al.*, 2006, 2014a; Blundell *et al.*, 2009; Bidegain *et al.*, 2009; Torrent *et al.*, 2010; Lascu and Plank 2013; Oldfield *et al.* 2014; Quijano *et al.*, 2014).

In this work, preliminary results from James Ross Archipelago lakes (NE Antarctic Peninsula) are presented. Sediment cores and water samples were taken from lake systems located on James Ross, Vega and Marambio islands (JRI, VI, MI, respectively, Fig. 1). Lake water’s pH and total dissolved solids exhibit

a wide range of variation (<7 to 10 and <50 to 5000 mg/L, respectively), differentiating MI from JRI and VI in these aspects, due to the evaporation processes and a deficit of biological activity on MI. Organic and inorganic carbon contents in sediments are low and points to the dominance of siliciclastic materials.

Thermomagnetic studies reveals in both JRI and VI the dominance of magnetite ($T_c = 580^\circ\text{C}$) and subordinated titanomagnetite and/or iron sulfur ($T_c = 290^\circ\text{C}$), goethite and hematite ($T_c = 110^\circ\text{C}$ and 680°C , Fig. 2). Lake Esmeralda (Fig. 1) shows a strong increase of magnetization after heating (sample ESM7-24, Fig. 2), maybe due to the initial presence of hematite or goethite and paramagnetic minerals, and their conversion to ferrimagnetic minerals.

Magnetic measurements of both JRI and VI sediments, suggest the presence of very fine ferrimagnetic minerals (magnetite, $<0.1 \mu\text{m}$), while Esmeralda is characterized by larger particles (1-5 μm); and MI by fine ferrimagnetic and paramagnetic minerals (0.2-1 μm , Fig. 3). Magnetic hysteresis shows that magnetites tend to be of single domain size (SD) for JRI and Anónima (in Vega island) and of pseudo-single domain size (PSD) for Esmeralda (Fig. 4). The relation between a magnetic concentration dependent parameter (χ) and a magnetic grain size dependent parameter ($\kappa_{\text{ARM}}/\kappa$) is shown in figure 5. MI and Esmeralda exhibits a trend of increasing χ and decreasing $\kappa_{\text{ARM}}/\kappa$, that is, higher magnetic particle concentration is accompanied by coarser magnetic grain size. In contrast, JRI and Anónima show a linear relationship between parameters χ and $\kappa_{\text{ARM}}/\kappa$, indicating a correlation of magnetic mineral concentration with decreasing grain size.

A multivariate statistical analysis of magnetic concentration, magnetic grain size, physico-chemical, and geochemical characteristics shows an inverse relationship between magnetic and physico-chemical variables. Moreover, statistically significant differences between lakes from each studied island are observed. These differences may be due to individual basin and lake environment characteristics and the processes (diagenetic, biological, geochemical, etc.) occurring in them.

Finally, Lake Anónima was selected to determine a curve of relative paleointensity (RPI) of high quality, and to calibrate these Antarctic lake sediments through its correlation with a dated RPI curve from Lake Esmeralda (Fig. 9). Five cores were correlated using χ and $\kappa_{\text{ARM}}/\kappa$ variations and

they were converted to a common sedimentary depth, using one core as the master core. For RPI normalization, sediments must satisfy requirements proposed e.g. by Tauxe (1998): NRM/ κ , NRM/ARM and NRM/SIRM ratios should only depend on the intensity of the geomagnetic field. Those ratios were normalized to the unity for comparison with records from other lakes. The NRM_{15mT}/ κ results (NRM_{15mT} is the remanence left after demagnetization with 15 mT) for the Anónima cores are shown in Figure 9 and compared to the corresponding Esmeralda mean curve (Irurzun *et al.*, 2013). Both curves show a similar behavior, with at least three possible lines of correlation. The minimum ratio NRM_{15mT}/ κ at 68 cm for Anónima is clearly correlated with Esmeralda minimum ratio at the age of 7,700 cal. years. This suggests that sediments recovered from Anónima may have recorded changes of the Earth magnetic field during the last 6,000-7,000 years.

We conclude that the magnetic proxies, besides being useful environmental indicators, allow the discrimination between study areas and also to select target region for future studies (e.g. paleomagnetism, environmental changes, etc.). The RPI technique is a very promising tool for dating sediments in Antarctic lakes. This study contributed to a better understanding of Antarctic lake systems from a multidisciplinary approach.

Keywords: lakes, paleomagnetism, Antarctic Peninsula, magnetic proxies.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades de los minerales presentes en sedimentos y su relación con parámetros magnéticos han sido de interés en una amplia variedad de estudios, los cuales se han enfocado al registro del campo magnético terrestre en el pasado (Creer 1974; Barton y McElhinny 1981; Creer *et al.*, 1983; Williams 1994; Böhnell y Molina-Garza 2002; Brachfeld *et al.*, 2003; Lund *et al.*, 2006; Chaparro *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009), a la interpretación de procesos ambientales naturales (Snowball *et al.*, 1999, 2002; Bidegain *et al.*, 2009; Torrent *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2012; Lascu y Plank 2013; Irurzun *et al.*, 2014a; Oldfield *et al.*, 2014; Quijano *et al.*, 2014) y a la evaluación de la contaminación antropogénica (Hunt *et al.*, 1984; Beckwith *et al.*, 1986; Desenfant *et al.*, 2004; Knab *et al.*, 2006; Chaparro *et al.*, 2007, 2012; Yang *et al.*, 2007;

Blundell *et al.*, 2009). Por su parte, el magnetismo ambiental investiga las propiedades magnéticas de suelos, sedimentos y polvo atmosférico. Tales mediciones brindan herramientas útiles para abordar problemas relacionados con cambios climáticos y ambientales (Maher *et al.*, 1999; Kravchinsky *et al.*, 2003; Evans y Heller, 2003). Los estudios de magnetismo ambiental llevados a cabo en testigos sedimentarios, también se interpretan en términos de cambios paleoclimáticos y paleoambientales.

Las características magnéticas de los distintos minerales presentes en sedimentos y suelos en un ambiente, constituyen indicadores o “huellas” magnéticas útiles puesto que establecen las bases para la utilización de estos parámetros magnéticos en la caracterización y evaluación de un sistema. No obstante, se ha observado que tales indicadores son variables y dependientes de las características del medio bajo estudio (ríos, suelos, sistemas lacustres). Lógicamente, cada ambiente posee características intrínsecas y es afectado por distintos factores (e.g., climáticos, biológicos, antropogénicos); por lo cual, pueden ocurrir diferentes procesos físico-químicos y biológicos en simultáneo. De este modo, los parámetros magnéticos registran la respuesta de estos forzantes y pueden dar información útil sobre el medio ambiente de manera rápida y con costos mínimos.

En esta contribución se describen las distintas técnicas y mediciones utilizadas en paleomagnetismo y magnetismo ambiental. El análisis y la interpretación de estos parámetros magnéticos, y su relación con estudios complementarios (sedimentológicos, limnológicos, hidroquímicos y geoquímicos) permiten identificar diferentes procesos, que inciden directamente en la dinámica y evolución ambiental de cada sistema. En particular, se tomará como caso de estudio, diversos sistemas lacustres del Archipiélago James Ross situado en el NE de la Península Antártica.

TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS MAGNÉTICOS E INTERPRETACIÓN

En Magnetismo Ambiental se investiga el comportamiento, grado de contaminación e historia de distintos tipos de ambientes (terrestre, fluvial, etc.) a través de un amplio conjunto de técnicas de medición y parámetros magnéticos (Thompson y Oldfield, 1986; Evans y Heller, 2003; Chaparro, 2006).

Las mediciones magnéticas proveen herramientas efectivas y poderosas para el análisis de problemas relacionados a cambios ambientales, incluyendo contaminación antropogénica, y climáticos (Maher y Thompson, 1999). En ese sentido, en cierto tipo de estudios, la utilización de un reducido número de parámetros magnéticos permite una buena aproximación de las características ambientales de un determinado sistema.

El uso de sólo algunos parámetros relevantes (e.g. susceptibilidad específica, χ , magnetización remanente anhística, MRA, y el cociente entre susceptibilidad anhística y volumétrica, $\kappa_{\text{MRA}}/\kappa$) constituye un ahorro efectivo en tiempo y trabajo, siendo especialmente positivo cuando el área de estudio es amplia y consecuentemente la cantidad de muestras involucradas puede ser grande. Entre los distintos casos de aplicación, pueden mencionarse los trabajos realizado por Blundell *et al.* (2009) y Lascu y Plank (2013). El primero de ellos fue realizado en suelos (5656 sitios) distribuidos en toda Inglaterra, donde se evaluó la influencia antropogénica con el parámetro χ . Por otro lado, Lascu y Plank (2013) recientemente estudiaron las características ambientales de sistemas lacustres de Minnesota (8 lagos, 349 muestras) con el cociente susceptibilidad anhística específica y magnetización remanente isotérmica $\chi_{\text{MRA}}/\text{MRI}$.

Técnicas de Medición

En los distintos estudios de magnetismo se realizan mediciones magnéticas no destructivas y destructivas. Las primeras involucran procesos reversibles, y corresponden a las mediciones de susceptibilidad magnética utilizando un campo magnético (H) muy débil ($H \sim 80$ A/m). Por otro lado, las mediciones destructivas modifican los estados magnéticos de los materiales en forma irreversible, adquiriendo magnetizaciones de remanencia. Las magnetizaciones remanentes (MR) pueden ser adquiridas utilizando simultáneamente campos magnéticos alternos (AF, con sus siglas en inglés) y continuos (MRA), o bien utilizando un intenso H pulsado (MRI). Aunque las mediciones magnéticas dependientes de la temperatura brindan valiosa información magnetomineralógica, son altamente destructivas produciendo, en la mayoría de los casos, transformaciones químicas y neo-formación de fases magnéticas (Chaparro, 2006).

Los ensayos orientados a los estudios de magnetismo ambiental involucran en general:

- Mediciones de susceptibilidad magnética a alta y baja frecuencia. Este parámetro es la medida de la facilidad con que un material se magnetiza y depende de los minerales magnéticos presentes, su concentración y características. La susceptibilidad se expresa como κ o χ (véase Apéndice 1).
- Determinación de ciclos de histéresis magnética con el fin de determinar la concentración, composición y granulometría de las partículas magnéticas.
- Mediciones de MRI y MRA. Cabe mencionar que tanto la MRA como la MRI de saturación (MRIS) también dependen de la concentración, pero a diferencia de κ , dependen sólo de la concentración de minerales ferromagnéticos: antiferromagnéticos y ferrimagnéticos.
- Medición de curvas termomagnéticas $M(T)$ con una Balanza de Curie, y dependencia de la susceptibilidad magnética con la temperatura. Estos métodos son utilizados para la identificación de minerales magnéticos. En este tipo de mediciones, las variaciones con la temperatura permiten la determinación de las temperaturas características de Curie (T_c) de distintos minerales magnéticos.
- Los distintos parámetros magnéticos y cocientes relacionados que pueden ser utilizados en Magnetismo Ambiental, se detallan en el Apéndice 1, donde también se detalla brevemente la interpretación de cada parámetro. No obstante, el lector que no está familiarizado con los estudios de magnetismo puede consultar los siguientes trabajos: King *et al.* (1982), Thompson y Oldfield (1986), Maher *et al.*, (1999), Evans y Heller (2003) y Chaparro (2006).

Minerales y Proxies Magnéticos

La señal magnética de los distintos minerales presentes en sedimentos y suelos está, generalmente, dominada por una fracción minoritaria de minerales ferromagnéticos *sensu lato*. Dicha fracción minoritaria de minerales magnéticos está constituida por minerales ferrimagnéticos como (titano) magnetita, y/o antiferromagnéticos como hematita. Estos minerales muchas veces no son detectados con las técnicas analíticas habituales, como por ejemplo difracción de rayos X, justamente por las bajas concentraciones. Las técnicas de Magnetismo Ambiental son suficientemente sensibles para determinar y discriminar tales señales. Es de destacar que en la

mayoría de los casos, la concentración de minerales ferromagnéticos en sedimentos no supera el 1% en peso.

La discriminación entre minerales magnéticos (o portadores magnéticos), es posible debido a las grandes diferencias en respuesta entre ellos, es decir, diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos. Por ejemplo, los valores de χ varían ampliamente de acuerdo al tipo de materiales magnéticos: diamagnéticos ($\sim -6 \times 10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$), paramagnéticos ($\sim 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$), antiferromagnéticos ($\sim 0,1-5,9 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$), y ferrimagnéticos ($\sim 0,3-5,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$). Valores más detallados pueden encontrarse, entre otros, en Hunt *et al.* (1995), Maher *et al.* (1999), Dearing (1999) y Peters y Dekkers (2003).

El “aumento magnético” (Le Borgne 1955; Tite y Linington, 1975) es un fenómeno que se debe a la conversión de materiales paramagnéticos a ferrimagnéticos *in situ*, o bien, a un aporte extra de materiales ferrimagnéticos. Éste ha sido un tema ampliamente estudiado y su origen puede estar relacionado a distintos mecanismos que ocurren en la naturaleza o bien causados por el hombre. Entre los posibles procesos que causan aumento magnético, pueden nombrarse: fermentación, calentamiento, incendios, actividad biológica, procesos químicos (Tite y Linington, 1975; Mullins, 1977; Thompson *et al.*, 1980; Thompson y Oldfield, 1986; Maher, 1986), migración de minerales magnéticos, alteración química por diferentes fluidos, contaminación por hidrocarburos (Rijal *et al.*, 2010; Elmore *et al.*, 2012; Mena y Walther, 2012), y finalmente, emisión y deposición de partículas contaminantes y magnetizadas de origen antropogénico (Chaparro *et al.*, 2006, 2007; Magiera *et al.*, 2006; Bučko *et al.*, 2010; Marié *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011).

Un sistema natural (lacustre, marino, etc.), en general, es complejo y sus características físicas, químicas y biológicas resultan de la interacción de numerosos factores ambientales y climáticos independientes (Last, 2002; Cohen, 2003; Liu *et al.*, 2012). En particular, los sistemas lacustres responden a cambios en las condiciones climáticas y del ambiente, y estas respuestas pueden quedar preservadas de varias maneras en el registro sedimentario (Battarbee, 2000; Last y Smol, 2001; Cohen, 2003).

Los indicadores indirectos o *proxy data* (isotópicos, magnéticos, sedimentológicos, mineralógicos, geoquímicos, polen, pigmentos, diatomeas, etc.) o

simplemente *proxies* son parámetros que permiten inferir una condición ambiental de manera indirecta. Son el resultado de determinadas condiciones ambientales actuantes durante la deposición de los archivos paleolimnológicos. Cuanto mayor sea la cantidad de *proxies* analizados (aproximación *multiproxy*), más exacta será la formulación de un modelo del comportamiento, dinámica y evolución ambiental de un sistema determinado que se derive de los mismos (Geiss *et al.*, 2003). Un parámetro debe reunir dos condiciones principales para constituirse como un *proxy* magnético: a) medición relativamente rápida y a un bajo costo; b) su significado debe ser claramente entendido, esto es, desde su definición y funcionamiento, hasta su interpretación ambiental a nivel regional y global (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007). Las ventajas fundamentales de los *proxies* magnéticos residen en los siguientes aspectos: sensibilidad; rapidez; facilidad de preparación de las muestras; relativamente bajo costo del equipamiento para la adquisición de datos; mediciones (en general) no destructivas. Entre las desventajas, debe mencionarse que la interpretación de *proxies* definidos a partir de cocientes de parámetros puede variar en distintos casos de estudio y, muchas veces, un correcto análisis requiere entrenamiento experto (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).

Las propiedades magnéticas involucran la respuesta de todos los constituyentes de una muestra y su uso suele ser muy apropiado como *proxies* de: a) concentración magnética; b) tamaño de grano magnético, c) herramientas de correlación entre testigos de sedimentos, perfiles de suelos, etc.; d) grabación del campo magnético terrestre; e) mineralogía magnética, f) registro de cambios climáticos y procesos ambientales; g) registro de la contaminación (Maher *et al.*, 1999; Kravchinsky *et al.*, 2003; Chaparro *et al.* 2006, 2007, 2013a, 2013b, 2015; Irurzun *et al.*, 2006, 2014a,b; Blundell *et al.*, 2009; Bidegain *et al.*, 2009; Torrent *et al.*, 2010; Lasco y Plank 2013; Quijano *et al.*, 2014; Oldfield *et al.* 2014).

CASO DE ESTUDIO: LAGUNAS ANTÁRTICAS DEL ARCHIPIÉLAGO JAMES ROSS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos de estudios magnéticos y geoquímicos realizados sobre sedimentos y aguas de diversas lagunas antárticas, las cuales están localizadas en el

Archipiélago James Ross. En los diferentes ambientes periglaciales de estas islas se desarrollan sistemas lacustres con características físicas, químicas y biológicas de gran variabilidad.

Área de Estudio

Los estudios se realizaron en el noreste de la Península Antártica (63°40'-64°20' S, 57°00'-58°00' O; Fig. 1), sobre las lagunas Seca, Chica, Blanca (Isla Marambio, IM; Fig. 1-C1), lagunas Buena y Roja (Isla James Ross, IJR, Fig. 1-C2) y lagunas Esmeralda y Anónima (Isla Vega, IV; Fig. 1,-C3). Los sistemas lacustres localizados en IM se desarrollan sobre rocas sedimentarias terciarias principalmente arenosas y poco consolidadas, mientras que las lagunas de IV e IJR, se localizan sobre depósitos glaciales conformados por rocas cretácicas (areniscas y limolitas) y volcánicas básicas de edad terciaria (Grupo Volcánico Isla James Ross). Estas lagunas presentan superficies que varían entre 1000 y 16000 m². Las profundidades de agua varían considerablemente de acuerdo a la localización de los sistemas, entre 10 y 20 cm (lagunas Seca, Chica, Blanca y Roja) y entre 270 cm y 610 cm (lagunas Buena, Anónima y Esmeralda).

Materiales y Métodos

Durante las campañas antárticas de verano de los años 2007, 2012, 2013 y 2014, se extrajeron testigos sedimentarios, muestras de sedimentos de fondo y de agua de los sistemas lacustres. En este trabajo se presentan datos de un total de 18 testigos (llamados: Se, Ch, Ch-4, Bl-1, Bl-2, Bl-4, Bl-5, Bu-7, Bu-8e, R-2, LA-18, LA-24, LA-26, LA-29, LA-32, ESM-4, ESM-6 y ESM-7) de longitudes que varían entre 9 cm y 241 cm; los cuales fueron extraídos de los sectores más profundos de cada laguna.

Previamente a la obtención de los testigos de sedimentos, se realizó la batimetría de cada laguna con el objeto de localizar el o los depocentros (región más profunda de la laguna) existentes. Estos sitios son de particular interés para la recolección de sedimentos ya que constituyen zonas de acumulación continua en las lagunas en condiciones "calmas" para el registro del campo magnético terrestre (cmt).

Los testigos de sedimentos se obtuvieron utilizando un bote inflable fijado a la costa por sogas y un perforador manual que permite obtener testigos

en tramos de hasta 1 m de longitud de espesor verdadero; los testigos son semicilíndricos de 7 cm de diámetro y de hasta 1 m de longitud. De esta forma, en los lagos con espesores de sedimentos mayores al metro (laguna Esmeralda) la herramienta se introdujo dos o más veces para obtener la secuencia sedimentaria completa. Luego de cada perforación, el semicilindro de sedimentos extraído fue puesto en un tubo de PVC cortado longitudinalmente, se recubrió con film termocontraíble para evitar oxidación de la materia orgánica y posteriormente se almacenó a 4°C.

En el laboratorio, se sub-muestrearon los testigos: i) recogiendo material cada 1 cm para estudios de magnetismo y análisis complementarios no magnéticos; ii) hincando sobre ellos cajas plásticas (8 cm³ de volumen) cada 2,5 cm para estudios de paleomagnetismo.

Las propiedades magnéticas de los sedimentos de fondos muestreados en cada laguna se determinaron a través de estudios de susceptibilidad magnética, magnetizaciones de remanencia, histéresis magnética y termomagnéticas. Para tal fin, se emplearon los siguientes instrumentos disponibles en los laboratorios del CIFICEN (UNCPBA, Tandil) y del Centro de Geociencias (UNAM, Querétaro, México): a) Susceptibilímetro MS3 (Bartington Instruments Ltd.) acoplado al sensor MS2B de frecuencia dual (470 y 4700 Hz) para la obtención de la susceptibilidad dependiente de la frecuencia; b) Desmagnetizador blindado, Molspin Ltd. Dispositivo para impartir MRA y MRA parcial (MRAp) Molspin Ltd.; c) Magnetizador de pulso modelo IM-30 (ASC Scientific) de hasta 2500 mT para la obtención de curvas de adquisición de la MRI; d) Magnetómetro de muestra rotante JR-6A (AGICO) para la cuantificación de las MR; e) Magnetómetro MicroMagTM 2900 Alternating Gradient Magnetometer, Princeton Measurements Corporation, para obtener curvas de la histéresis magnética y mediciones de MRI.; f) Una balanza de Curie para realizar estudios termomagnéticos (mediciones M(T)).

Por otro lado, se realizaron mediciones geoquímicas (carbono orgánico e inorgánico) y texturales en las muestras de sedimento. La materia orgánica, expresada como carbono orgánico total (COT), y la cantidad de carbonatos, expresados como carbono inorgánico total (CIT), se determinaron por el método de "pérdida por ignición secuencial" (LOI, *lost on ignition* en sus siglas en inglés). Para los

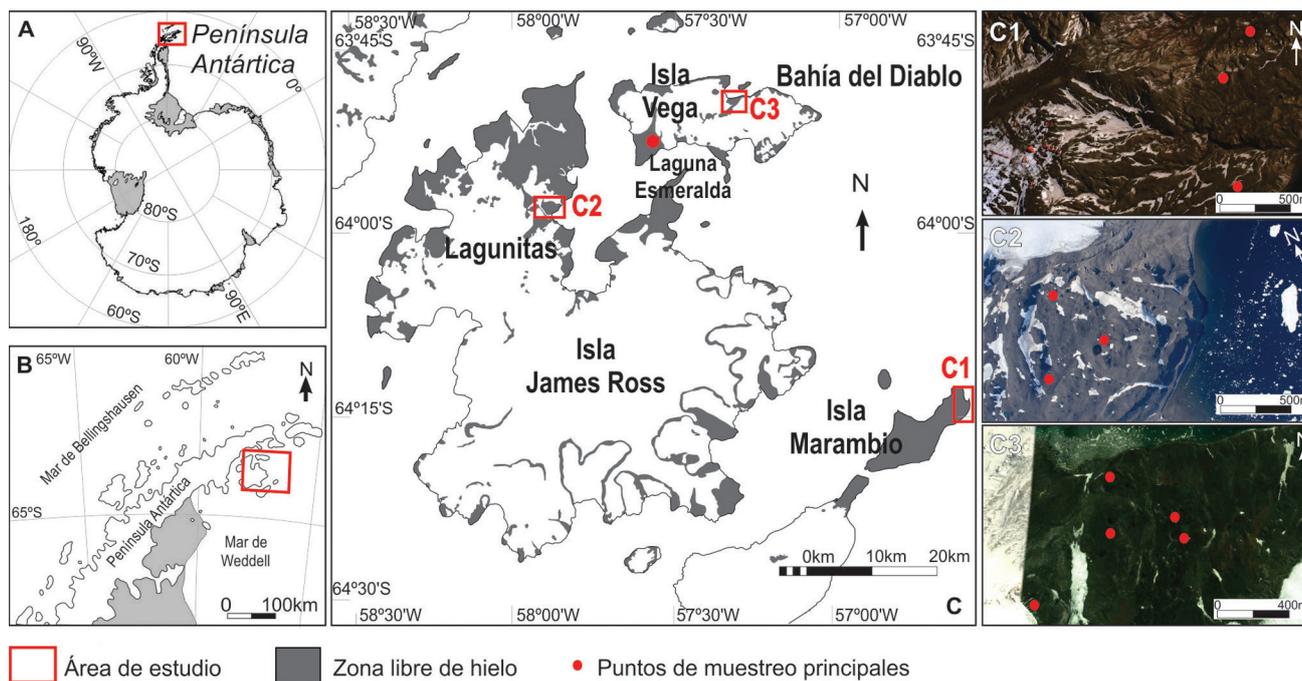


Figura 1. a) Mapa del continente Antártico. b) Mapa de la Península Antártica. c) Mapa de detalle donde se muestran las principales áreas de muestreo en islas Marambio, James Ross y Vega (rectángulo rojos C1, C2, C3); los recuadros de la derecha de la figura corresponden a fotografías aéreas tomadas sobre la zona.

Figure 1. a) Map of the Antarctic continent. b) Map of the Antarctic Peninsula. c) Detailed map showing main sampling areas in the Marambio, James Ross and Vega Islands (marked with red squares: C1, C2, C3); the insets (on the right) show the region from aerial photographs.

análisis LOI, las muestras fueron secuencialmente calentadas a 105°C (24 h), 550°C (4 h) y 950°C (2 h) de acuerdo al protocolo establecido por Heiri *et al.* (2001) utilizando un horno con control de temperatura en el laboratorio del CICTERRA (UNC, Córdoba).

Asimismo, se tomaron muestras de agua y nieve fresca de cada sistema lacustre. Tanto en las muestras de agua como de nieve, se realizaron determinaciones *in situ* de parámetros físico-químicos (pH, temperatura, sólidos totales disueltos y alcalinidad por titulación). El pH se midió con un pHmetro Hanna; la temperatura y las concentraciones de sólidos totales disueltos se determinaron a partir de un equipo Hach. La titulación de la alcalinidad se realizó utilizando indicadores (verde de bromocresol y rojo de methilo) hasta el punto final a pH 5,1. Luego, las muestras se filtraron con filtros de acetato de celulosa (tamaño de poro < 0,2 μm) y se almacenaron para la determinación de cationes y aniones en laboratorios (ICP-MS ActLabs, Canadá y cromatógrafo de iones CICTERRA-UNC, respectivamente).

La caracterización estadística de las lagunas y la relación entre las variables físico-químicas y magnéticas se analizó utilizando la metodología propuesta por Lebart *et al.* (1995) en la que se combina un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) y luego una clasificación no jerárquica con el método de K-medias. El PCA es una técnica estadística exploratoria que permite estudiar las relaciones entre parámetros de manera multivariada y el método de clasificación permite construir grupos separados homogéneos de manera autónoma en base a su varianza (Everitt y Hothorn, 2011).

Resultados y Discusión del Caso de Estudio

Se realizó un análisis integrador con los resultados magnéticos y geoquímicos de los sedimentos de fondo y junto con los hidroquímicos de las lagunas, los cuales se obtuvieron a partir de las distintas técnicas mencionadas. Las mediciones realizadas permitieron el reconocimiento de características particulares de los diferentes ambientes en cada isla y la datación de sedimentos antárticos. En especial, se

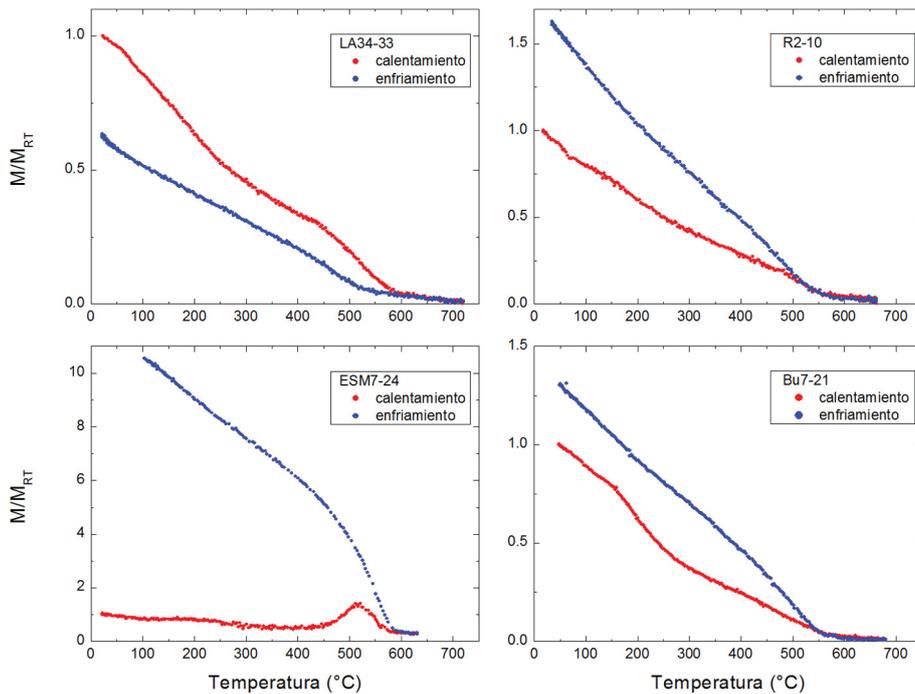


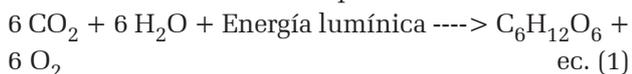
Figura 2. Mediciones termomagnéticas de muestras de sedimentos correspondientes a las lagunas Anónima (LA34-33), Esmeralda (ESM7-24), Roja (R2-10) y Buena (Bu7-21). Las temperaturas de Curie corresponden a (titano) magnetita y a fases magnéticas de alta coercitividad.

Figure 2. Thermomagnetic measurements of sediment samples from Lakes Anónima (LA34-33), Esmeralda (ESM7-24), Roja (R2-10) and Buena (Bu7-21). The Curie temperatures correspond to magnetite and to high coercivity phases.

pone énfasis en el estudio de parámetros magnéticos y su potencial como indicadores ambientales.

Magnetismo Ambiental y Estudios Complementarios.

Los resultados desde el punto de vista hidroquímico indican que tanto las lagunas localizadas en IJR como en IV presentan gran variación de pH oscilando entre aguas neutras a claramente alcalinas (10,2), mientras que los valores de pH en IM se mantienen relativamente constantes (~7,0). La única laguna con características ácidas (pH ~ 5,7) es Esmeralda en IV. Los valores más alcalinos son producto de la fotosíntesis de algas y cianobacterias presentes en las lagunas (Nedbalova *et al.*, 2012; Skácelová *et al.*, 2013). En la ecuación química de la fotosíntesis, se observa que el dióxido de carbono (CO₂) es consumido durante la misma, lo que ocasiona aumentos en los valores de pH:



Los valores de los sólidos totales disueltos (STD) evidencian aguas en general diluidas (22 a 342 mg/L) para IJR e IV, mientras que IM presenta STD entre 1570 y 5190 mg/L. Estos últimos sistemas endorreicos son afectados por procesos de evaporación (régimen hídrico negativo), evidenciado por las altas concentraciones iónicas disueltas y la precipitación de sales observadas en las márgenes. Las lagunas de cada

isla también se diferencian según la clasificación geoquímica de Piper (1944). Las lagunas de IV son claramente cloruradas sódicas, mientras que las de IJR presentan sus aguas más bicarbonatadas y sin catión dominante. Por último, las lagunas de la IM son sulfatadas y tampoco exhiben ningún catión dominante.

Analizando la relación COT/CIT/silicoclástica en los sedimentos de dos lagunas diferenciables en IV (Esmeralda y Anónima), se observa en ambas, una composición siliciclástica predominante. Los valores de COT son relativamente bajos, debido a la baja productividad primaria (comunidades de organismos) y se observan claras diferencias entre las lagunas Esmeralda (1,1-2,3%, media= 1,7%) y Anónima (0,4-1,4%, media= 1,0%). Por otro lado, los valores de CIT son muy bajos para las dos lagunas; Esmeralda (media= 0,2%) y Anónima (media= 0,1%), lo cual sugiere la presencia de una única fuente clástica.

Los estudios termomagnéticos revelan un comportamiento similar entre los sedimentos de IJR y IV (Fig. 2). En ambos sitios se encuentra una fase ferrimagnética principal correspondiente a magnetita (T_c= 580°C), y adicionalmente fases secundarias correspondientes posiblemente a titanomagnetitas y/o sulfuros de hierro (T_c= 290°C), goethita y hematita (T_c= 110°C y 680°C). En la curva de

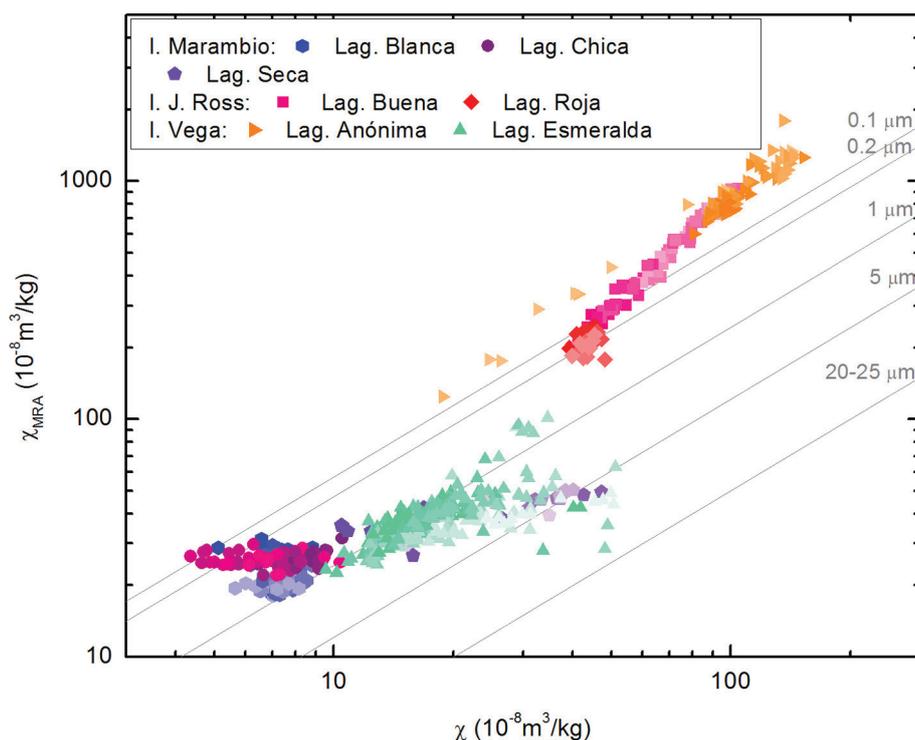


Figura 3. Gráfico de King (χ versus χ_{MRA}) para muestras de testigos de sedimentos pertenecientes a las distintas lagunas. Las líneas corresponden a valores de referencia para minerales del tipo magnetita (King *et al.*, 1982). En cada laguna, los colores más claros corresponden a muestras de sedimentos más profundas.

Figure 3. King's Plot (χ versus χ_{MRA}) for lake sediment samples from each lake. Reference lines correspond to magnetite minerals (King *et al.*, 1982). For each lake, lighter colors correspond to deeper sediment samples.

calentamiento de ESM7-24 se observa un incremento de la magnetización que comienza $\sim 430^{\circ}\text{C}$, lo cual es consistente con la presencia de minerales del tipo hematita/goethita, como han reportado Hanesch *et al.* (2006) y Quijano *et al.* (2014). Por otro lado, en las curvas de enfriamiento puede observarse la importante conversión de minerales paramagnéticos a ferrimagnéticos para la muestra ESM7-24 correspondiente a la laguna Esmeralda. Estos resultados son coherentes con los valores de coercitividad de remanencia (H_{cr}) obtenidos para la laguna Buena ($H_{cr} = 58\text{-}82$ mT), laguna Roja ($H_{cr} = 38\text{-}75$ mT), laguna Esmeralda ($H_{cr} = 29\text{-}75$ mT) y laguna Anónima ($H_{cr} = 44\text{-}53$ mT).

Los estudios de mineralogía magnética (Fig. 3) indican que las magnetitas son de tamaños de grano fino ($0.2\text{-}1$ μm) para los sedimentos de IM, y muy fino (<0.1 μm) para los sedimentos de IV e IJR, con excepción de la laguna Esmeralda ($1\text{-}5$ μm). A partir de los estudios de histéresis magnética se observa que los granos de magnetita tienden a la región de dominio simple (DS) para lagunas de IJR (Buena y Roja) y Anónima. Por otro lado, los granos magnéticos de la laguna Esmeralda se encuentran en la región pseudo dominio simple (PDS, Fig. 4).

A partir de los parámetros χ (que depende de la concentración minerales magnéticos) y κ_{MRA}/κ

(que depende del tamaño de grano magnético), se observan diferencias importantes entre los minerales magnéticos pertenecientes a los sedimentos de las lagunas bajo estudio (Fig. 5). Además del agrupamiento, las muestras pertenecientes a la IM y la laguna Esmeralda muestran un aumento en la concentración de minerales magnéticos indicado por un aumento en χ , seguido de un decrecimiento de κ_{MRA}/κ , es decir, mineralogía magnética más gruesa. En contraposición, los sedimentos de las IJR y laguna Anónima, muestran una relación lineal entre los parámetros χ y κ_{MRA}/κ , lo cual indica que el aumento en concentración magnética se corresponde con mineralogía magnética más fina.

El análisis conjunto de las distintas mediciones magnéticas reveló la presencia predominante de minerales ferrimagnéticos del tipo magnetita en los sedimentos de IJR e IV. En sedimentos de IM, por el contrario, se observa una importante contribución de minerales paramagnéticos. Estas diferencias se pueden asociar a los distintos procesos que ocurren en los sistemas lacustres (e.g. químicos y biológicos), así como, las distintas características de origen de las lagunas. Con relación a esto último, las lagunas pertenecientes a IM están ubicadas sobre rocas sedimentarias terciarias principalmente arenosas y poco consolidadas. Por otro lado, las lagunas de

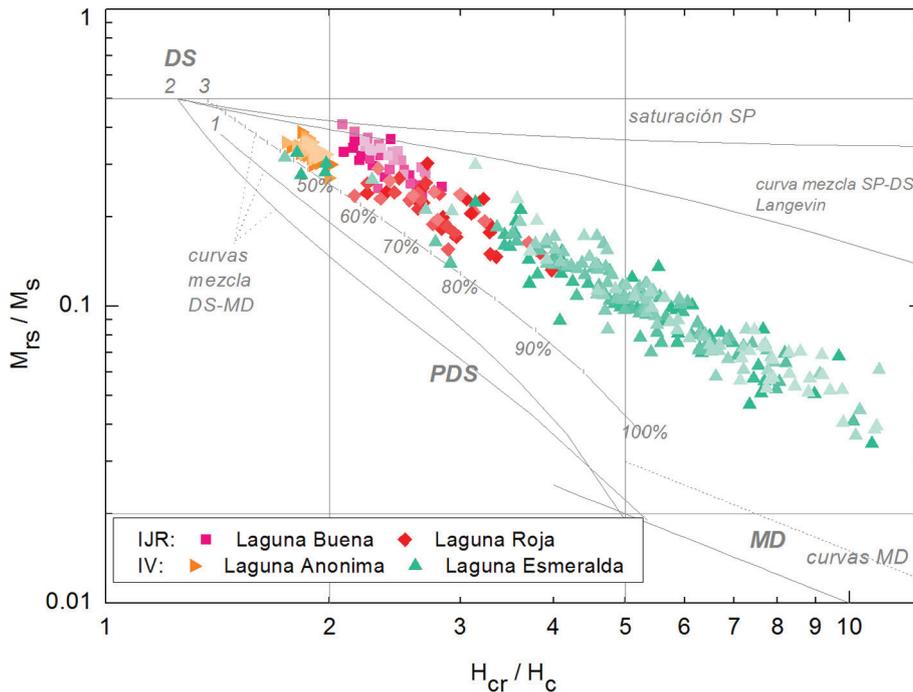


Figura 4. Gráfico de Day para muestras de testigos de sedimentos pertenecientes a las distintas islas. Las regiones y líneas de referencia fueron modificadas de acuerdo a Dunlop (2002). En cada laguna, los colores más claros corresponden a muestras de sedimentos más profundas.

Figure 4. Day's Plot for lake sediment samples from each island. Regions and reference lines were modified from Dunlop (2002). Lighter colors correspond to deeper sediment samples for each lake.

IV e IJR están ubicadas sobre depósitos glaciarios con abundantes clastos volcánicos de origen local, y en contacto erosivo sobre las rocas infrayacentes: areniscas y limolitas cretácicas y rocas volcánicas básicas de edad terciaria (Grupo Volcánico Isla James Ross). De acuerdo a Chaparro (2006), los estudios preliminares realizados en distintas rocas de Marambio muestran que los valores de susceptibilidad magnética para rocas volcánicas ($\kappa = 590 \times 10^{-5}$ SI) son mucho mayores que aquellos medidos en rocas sedimentarias ($\kappa = 20 \times 10^{-5}$ SI).

Del análisis de las variables magnéticas, además del aporte detrítico (litogénico) en las lagunas antárticas, se espera una contribución a la señal magnética de al menos una componente, lo cual se debería a la presencia de minerales antiferromagnéticos (hematita/goethita) y/o de otros minerales ferrimagnéticos (sulfuros de hierro), probablemente producidos por diagénesis de los minerales originales, y/o a una componente generada por la actividad biológica (magnetita biogénica). Si bien la probable presencia de magnetita biogénica, se basa en la alta estabilidad magnética de las muestras de laguna Anónima y su tamaño de grano magnético fino ($< 0.1 \mu\text{m}$) observado de los gráficos de King (Fig. 3) y Day (Fig. 4), como así también a la correlación significativa entre parámetros magnéticos y el contenido de COT, se necesitan estudios adicionales para verificar y

confirmar esta hipótesis. Se destaca que resultados similares fueron recientemente hallados en estudios detallados de sedimentos lacustres de una serie de 8 lagos en el estado de Minnesota (EE.UU., Lascu y Plank, 2013). En tal estudio, Lascu y Plank (2013) encuentran correlaciones positivas entre parámetros magnéticos y COT, así como una asociación entre muestras ricas en MO y magnetitas con granos más finos, estas últimas identificadas como componentes biogénicas (bacterias magnetotácticas).

La clasificación de las lagunas a través del método no jerárquico se aplica sobre los componentes principales que acumulen más del 80% de la varianza explicada. Los resultados obtenidos del análisis estadístico muestran que existen relaciones inversas entre las variables magnéticas y las físico-químicas (Fig. 6). El plano coordinado CP1-3 (~76% de reconstrucción) muestra que las variables de concentración (χ y MRA) se encuentran en relación con la variable Alcalinidad, mientras que la variable dependiente del tamaño de grano magnético ($\kappa_{\text{MRA}}/\kappa$) se relaciona con las restantes variables físico-químicas (con excepción del pH). Las lagunas se agruparon en tres grupos, uno de ellos formado por lagunas de IM (grupo I) y el otro por dos lagunas de IJR (Buena y Roja) e IV (Esmeralda) (grupo II); la laguna Anónima quedó sin integrarse a ninguno de estos formando un tercer grupo (grupo III). Es posible realizar la

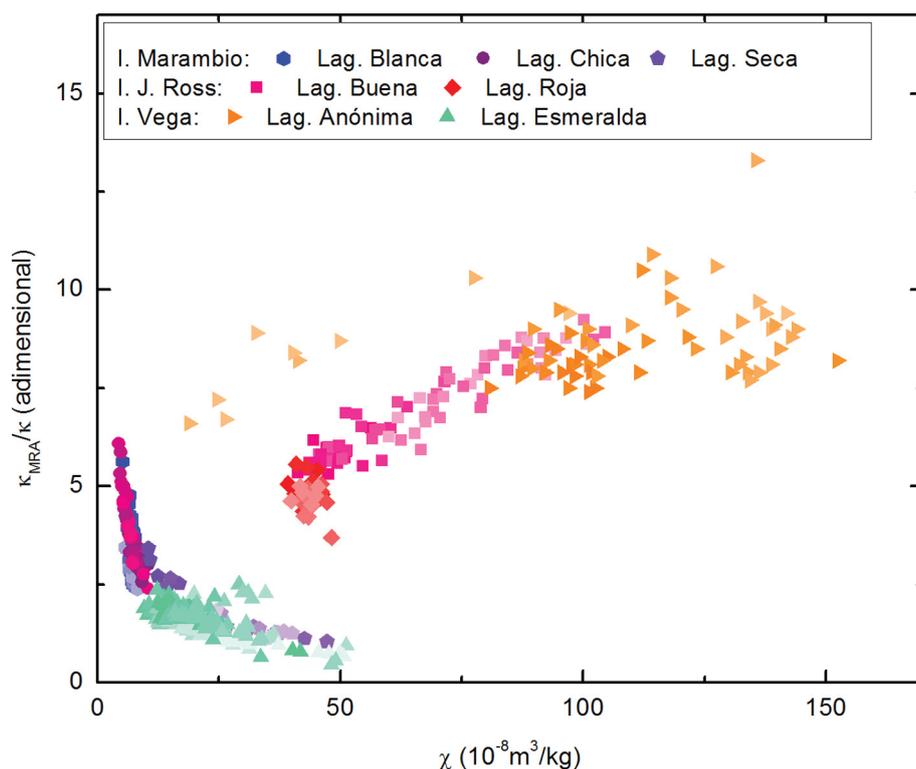


Figura 5. Gráfico bivariado de parámetros dependientes de la concentración magnética (χ) y del tamaño de grano magnético (κ_{MRA}/κ). Se observan claras diferencias entre las lagunas estudiadas. En cada laguna, los colores más claros corresponden a muestras de sedimentos más profundas.

Figure 5. Biplot using magnetic grain size (κ_{ARM}/κ) and concentration (χ) dependent parameters. Clear differences between lakes are observed. For each lake, lighter colors correspond to deeper sediment samples.

identificación de las lagunas que se encuentren lo más cercano a su centro de grupo (e.g. C1, C2 y C3 en Fig. 6). Estas lagunas son conocidas como individuos *patrón*. Con la técnica multivariada de agrupamiento se busca determinar grupos bien diferenciados entre ellos, a través de una distancia de similitud (cuanto mayor la distancia, más distinto serán entre ellos) y con características relativamente homogéneas dentro de cada uno (Everitt y Hothorn, 2011). Entonces, es de esperar que, los individuos *patrón* sean los más diferentes entre ellos. Los resultados del análisis identificaron como individuos *patrón* a las lagunas Blanca (grupo I), Buena (grupo II) y Anónima (grupo III), siendo las lagunas que presentan las características significativamente diferentes entre ellas (Fig. 6).

Estudios de Paleomagnetismo. Los cuerpos de agua y sus sedimentos son ampliamente utilizados para estudios paleoclimáticos y paleomagnéticos en diversos ambientes tectónicos y geológicos, a diferentes altitudes y bajo distintas condiciones climáticas (Stoner *et al.*, 2002; Cohen, 2003; Irurzun *et al.*, 2006, 2014a; Chaparro *et al.*, 2008; Gogorza *et al.*, 2012), así como la relación entre los parámetros magnéticos obtenidos y los cambios ambientales

mediante el uso de métodos matemáticos (Peralta *et al.*, 2013). Los estudios paleomagnéticos son muy escasos en la Antártida. La mayoría de los estudios en dicho continente se llevaron a cabo en núcleos de hielo, sedimentos marinos o rocas ígneas y sólo unos pocos en lagos (Willmott *et al.*, 2006; Wilson *et al.*, 2007; entre otros). El principal problema para calibrar los sedimentos en esta región es, por un lado la limitada cantidad de materia orgánica y, en consecuencia, las cantidades bajas de carbono orgánico para obtener una datación confiable por radiocarbono; y por otro lado, el efecto reservorio (Doran *et al.*, 1999).

El propósito del estudio paleomagnético se centra en obtener una curva de paleointensidades relativas (PIR) de alta calidad, y calibrar los sedimentos antárticos a través de su correlación con otras PIR. Para poder realizar este estudio, se debe contar con varios testigos de sedimento para que en cada nivel se pueda obtener un promedio más representativo y un menor error. Para ejemplificar la técnica, se mostrará el trabajo realizado con cinco testigos sedimentarios obtenidos de la laguna Anónima (IV). En primer lugar, los testigos se correlacionan unos con otros con el objeto de llevar todos los niveles sedimentarios a una profundidad común. Para esto

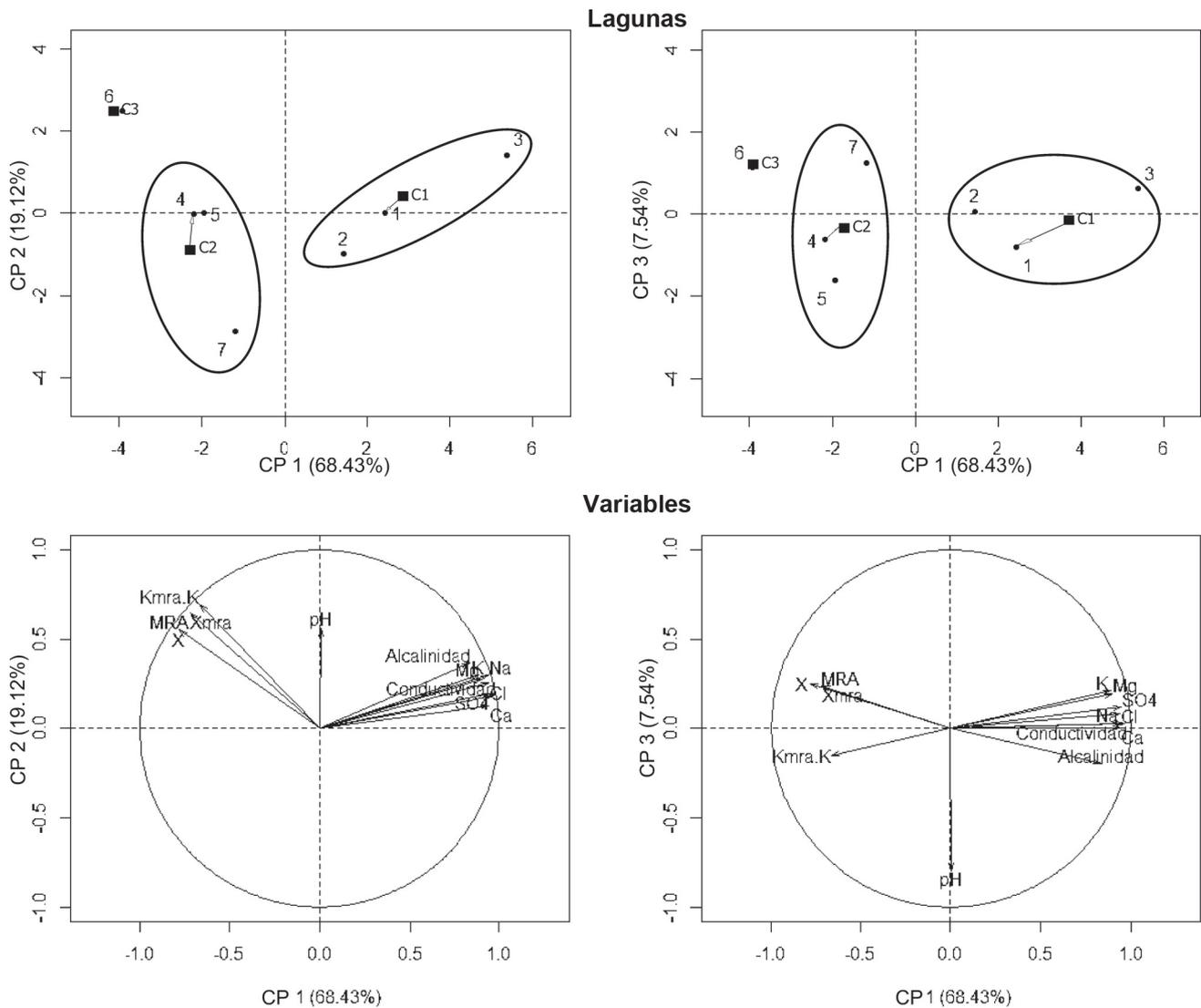


Figura 6. Representación de las lagunas (*Lagunas*) y las variables magnéticas y físico-químicas (*Variables*) utilizando en los planos coordenados CP1-CP2 (87% de varianza explicada) y CP1-CP3 (76% de varianza explicada). Encerrados en los círculos se encuentran identificados los grupos de islas y sus respectivos centros C1, C2 y C3 obtenidos por el análisis de agrupamiento. Laguna Blanca (1, patrón), Laguna Chica (2), Laguna Seca (3), Laguna Buena (4, patrón), Laguna Roja (5), Laguna Anónima (6, patrón), Laguna Esmeralda (7).

Figure 6. Principal component analysis (PCA) for all lakes (*Lagunas*) using magnetic and physico-chemical variables (*Variables*). The first principal components (PC1, PC2 and PC3) are shown. PC1-PC2 and PC1-PC3 accounted for 87% and 76% of the total variance, respectively. Different groupings of individuals (belonging to different regions) were obtained using the clustering analysis, which center is represented by C1, C2 and C3 for each group. The individuals correspond to Lake Blanca (1, *paragon*), Lake Chica (2), Lake Seca (3), Lake Buena (4, *paragon*), Lake Roja (5), Lake Anónima (6, *paragon*), Lake Esmeralda (7).

se elige un testigo como patrón y el resto de los testigos se “conectan” mediante líneas de correlación utilizando los datos de χ y κ_{MRA}/κ . Entre dos de estas líneas se realiza una interpolación lineal. En el caso de la laguna Anónima se eligió como testigo patrón el denominado LA-24, ya que tiene la longitud suficiente (63,8 cm) como para poder correlacionar

tanto los testigos superficiales como los más profundos. El resultado de la correlación se puede ver en la figura 7.

Para poder utilizar el método de normalización, que será detallado más adelante, en la determinación de las PIR, los sedimentos deben cumplir los requisitos propuestos por Tauxe (1998). Dichos requisitos

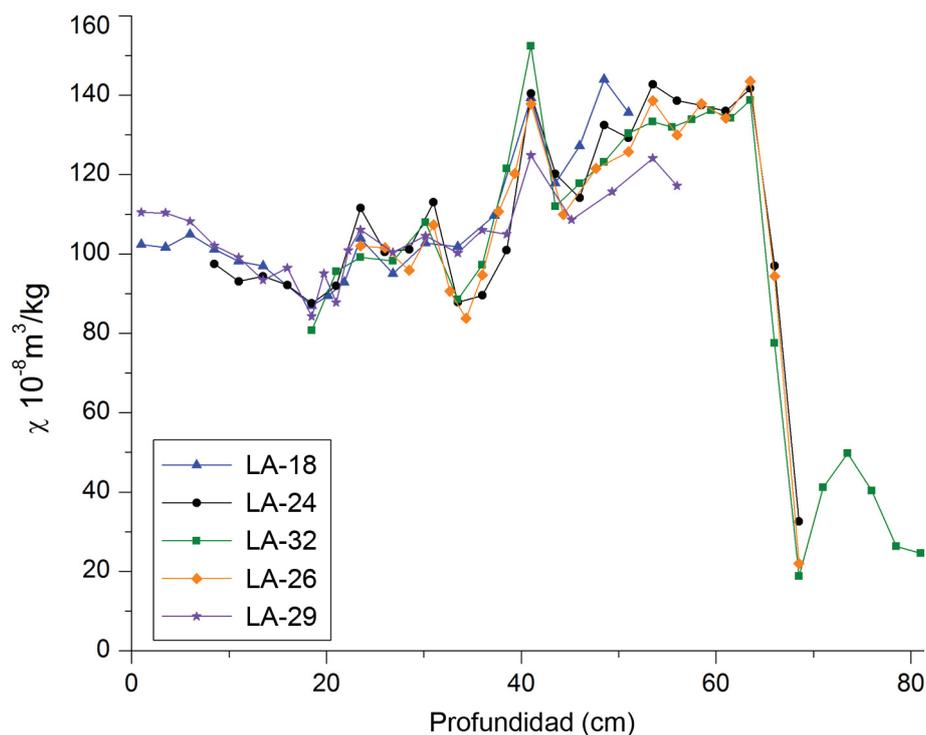


Figura 7. Variaciones de susceptibilidad magnética con la profundidad y resultado de correlacionar los testigos LA-18, LA-26, LA-29 y LA-32 con LA-24 (testigo patrón).

Figure 7. Depth magnetic susceptibility variations and results of using correlation tie lines between cores from Lake Anónima, i.e. cores LA-18, LA-26, LA-29, and LA-32 and the master core LA-24.

son: magnetita como portador principal de la remanencia, desmagnetización monocomponente por campos alternos de la magnetización remanente natural (MRN), tamaño de grano y concentraciones de minerales magnéticos con variaciones menores a un orden de magnitud. En la figura 8 se muestran las curvas de desmagnetización de dos muestras de laguna Anónima para representar los comportamientos típicos observados. La muestra LA24-22 presenta una MR viscosa (MRV) que se elimina luego de los primeros pasos de desmagnetización. Mientras que en la muestra LA24-16 se observa un comportamiento monocomponente a lo largo de todo este proceso. Los estudios de magnetismo de rocas realizados en la laguna Anónima proporcionaron resultados favorables para la aplicación de este método.

La MRN de una muestra depende principalmente de la intensidad del cmt presente al momento de consolidarse el material y de la concentración de minerales magnéticos. Esta última contribución puede ser removida de la señal de MRN al realizar el cociente con otro parámetro que también sea dependiente de la concentración, como puede ser κ , MRA y MRIS. De esta manera MRN/κ , MRN/MRA y $MRN/MRIS$, en principio, sólo serán dependientes de las variaciones de intensidad del cmt (Tauxe 1998). Por último, cada uno de estos cocientes se normaliza

a la unidad para su comparación con registros de otros lagos.

Se utilizó el valor de la MRN desmagnetizada a 15 mT como MRN estable de las muestras (MRN_{15mT}) debido a la presencia de una MRV que desaparece con las desmagnetizaciones a 5 y 10 mT. En la figura 9 se muestran los resultados del cociente MRN_{15mT}/κ para los cinco testigos de la laguna Anónima promediados y normalizados a la unidad y la curva promediada obtenida para la Laguna Esmeralda. La datación radiocarbónica del registro de la laguna Esmeralda se realizó en las muestras sedimentarias más ricas en materia orgánica (Irurzun *et al.*, 2013) y las curvas de PIR se correlacionaron con otras PIR de la zona (Brachfeld *et al.*, 2000; Stoner *et al.*, 2002; Gogorza *et al.*, 2012; Lisé-Pronovost *et al.*, 2013). De acuerdo con el trabajo de Ingólfsson *et al.* (1998), la deglaciación, calentamiento y retroceso glaciar en el área de las islas James Ross y Vega se produjo hace unos 4500-8000 años, por lo que se puede suponer que durante este período se formó la cuenca en la que actualmente se encuentra ubicada la laguna Anónima. Asimismo, Carrivick *et al.* (2012) presentan un compendio de las fluctuaciones de glaciares holocenos en la Península de Ulu (Isla James Ross) registradas por otros autores a partir de distintos *proxies*, datos fosilíferos y material orgá-

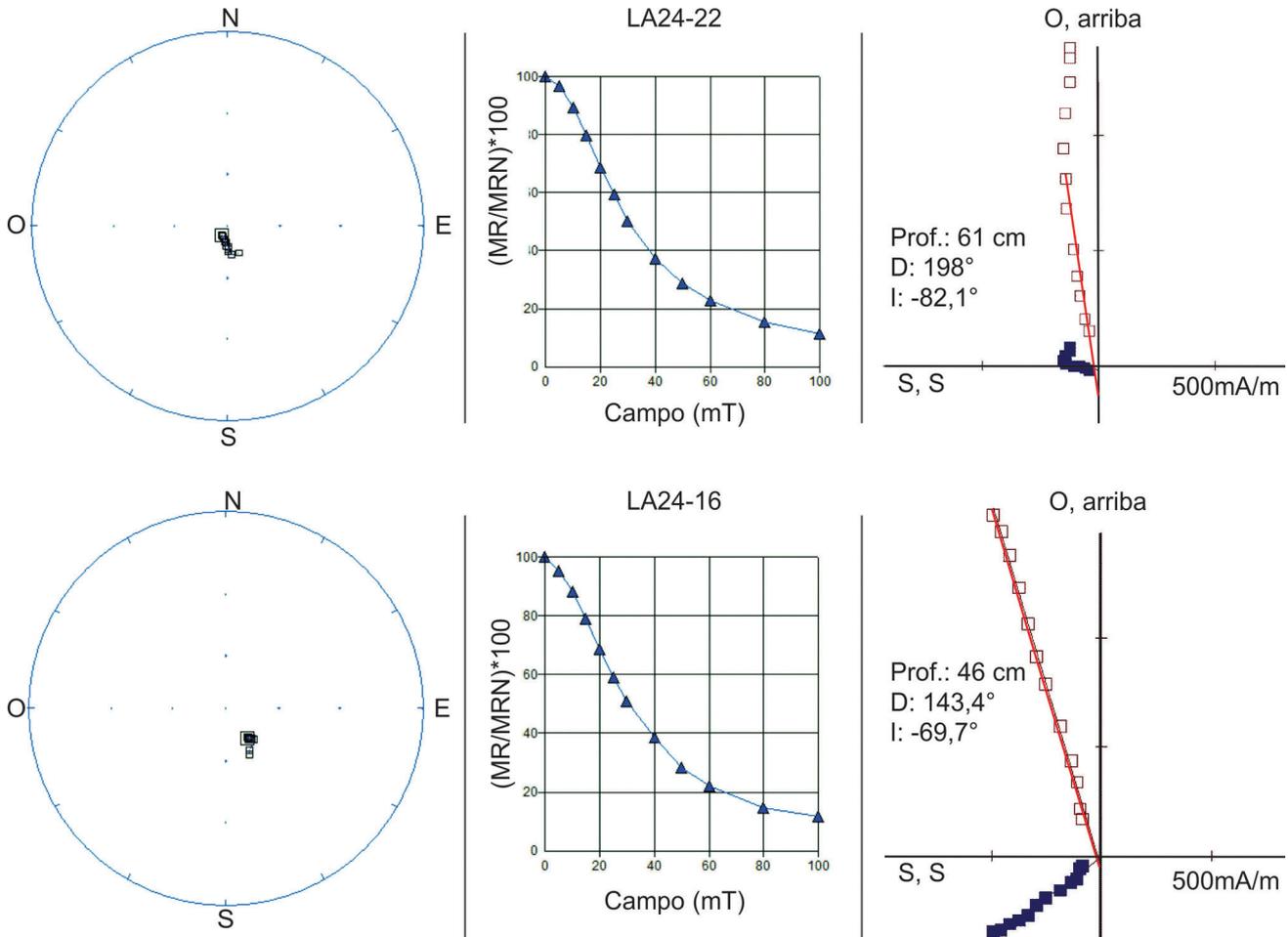


Figura 8. Representación de la dirección e intensidad de la remanencia magnética en gráficos estereográficos (izquierda), cartesianos (centro) y de Zijderveld (derecha) para dos muestras de la Laguna Anónima. Los cuadrados llenos indican la proyección O-S y los cuadrados vacíos la proyección Z-S.

Figure 8. Representation of direction and intensity of magnetic remanence in stereographic (left), cartesian (center) and Zijderveld (right) plots for two samples of Lake Anónima. The solid squares indicate the projection W-S and the open squares the projection Z-S.

nico en sedimentos de lagos, sedimentos marinos y glaciales y superficies costeras. Concluyen señalando que la deglaciación del Último Máximo Glacial habría finalizado probablemente hace ~7500 años AP, y que se habrían sucedido re-avances glaciarios hasta los ~4700 años AP, ambas en edades radiocarbónicas.

Las Lagunas Anónima y Esmeralda exhiben un comportamiento similar entre ambas curvas lo que permite distinguir al menos tres posibles líneas de correlación (Fig. 9). Las curvas de Anónima presentan valores máximos mayores que Esmeralda, esto puede deberse a diferencias en tamaños de grano magnéticos que no fueron eliminados durante la normalización. De todas maneras, el mínimo de

MRN_{15mT}/κ en Anónima a los 68 cm se correlaciona claramente con el mínimo en Esmeralda a los 7700 años calibrados AP. Aún existen grandes incertezas con respecto al cálculo del efecto reservorio en sedimentos antárticos; no obstante, si se considerara la corrección por efecto reservorio de alrededor de 1300 años utilizada por Ingólfsson *et al.* (1998), podría inferirse que los sedimentos recuperados de la Laguna Anónima contienen la información de los cambios del campo magnético terrestre para los últimos 6000-7000 años.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se discute la importancia

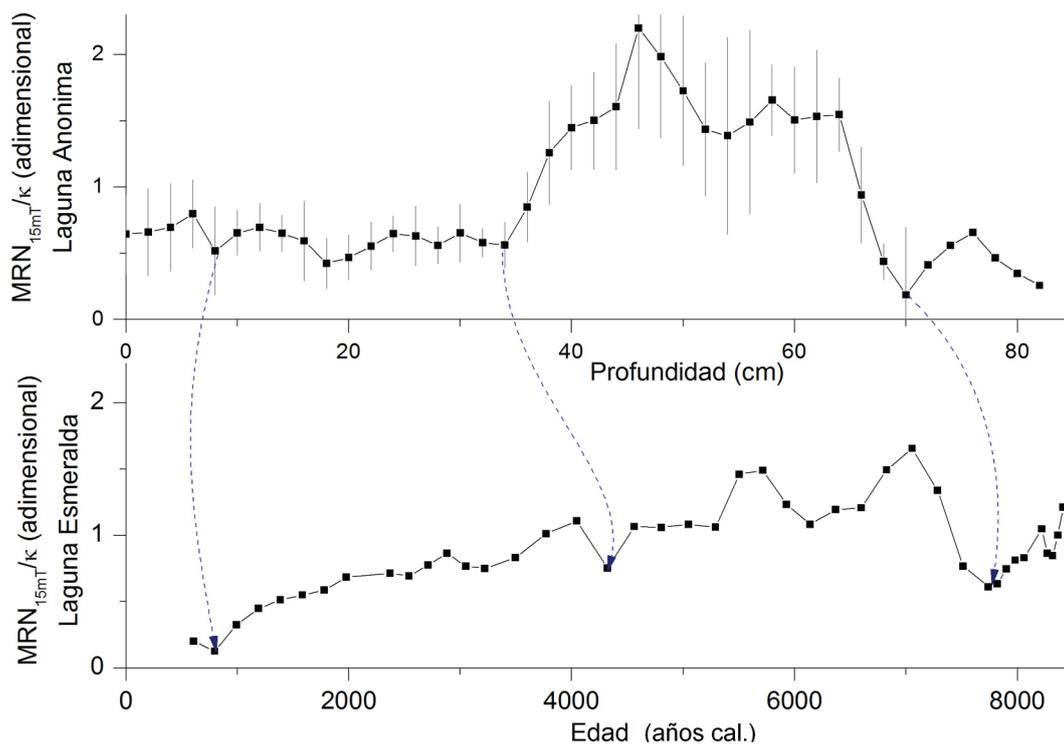


Figura 9. Resultados del cociente MRN_{15mT}/κ para los cinco testigos de Laguna Anónima promediados y normalizados a la unidad y la curva promediada obtenida para la Laguna Esmeralda. Se observan características similares entre ambas curvas que permite distinguir al menos tres posibles líneas de correlación (en color azul) entre las lagunas. Las edades calibradas no han sido corregidas por efecto reservorio y corresponden a dataciones mediante estudios de ^{14}C (Irurzun *et al.*, 2013).

Figure 9. Results from ratio MRN_{15mT}/κ for five cores from Lake Anonima (averaged and normalized results) and the averaged curve from Lake Esmeralda. It is observed similar features between both curves, which allow distinguish three correlation tie lines (in blue color) between lakes. Calibrated dates were not corrected for reservoir effect and correspond to radiocarbon dates (Irurzun *et al.*, 2013).

de los parámetros magnéticos y la potencialidad que poseen las distintas técnicas y mediciones utilizadas en Magnetismo Ambiental (susceptibilidad magnética, magnetizaciones remanentes, histéresis magnética y estudios termomagnéticos) para aportar indicadores de gran utilidad en estudios relacionados con cambios ambientales y climáticos. En particular, el análisis del caso de estudio presentado contribuye a mejorar y profundizar el conocimiento de los sistemas lacustres antárticos desde un abordaje multidisciplinario, focalizándose en el uso de los parámetros magnéticos.

El análisis conjunto de las mediciones termomagnéticas y de H_{cr} revela la presencia predominante de minerales ferrimagnéticos del tipo magnetita en los sedimentos de la Isla James Ross (IJR) y la Isla Vega (IV). En sedimentos de la Isla Marambio (IM), por el contrario, se observa una importante contribución de minerales paramagnéticos. Estos resultados son

consistentes con las litologías presentes en cada una de las islas. Además del aporte detrítico, a partir del análisis de las variables magnéticas, surge que en las lagunas antárticas se espera una contribución a la señal magnética de al menos una componente más: i) por la presencia de otros minerales ferrimagnéticos (sulfuros de hierro) probablemente producidos por diagénesis de los minerales originales, y/o ii) por la actividad biológica (magnetita biogénica).

Los parámetros χ y κ_{MRA}/κ , que dependen de la concentración de minerales magnéticos y su tamaño de grano magnético respectivamente, muestran diferencias importantes entre los sedimentos de las lagunas bajo estudio. Las lagunas de la IM y la laguna Esmeralda muestran un aumento en la concentración de minerales magnéticos con mineralogía magnética más gruesa. En contraposición, los sedimentos de las IJR y laguna Anónima, muestran un aumento en concentración magnética con mineralogía magnética

más fina. Además de permitir la discriminación entre las áreas de estudio y su elección para estudios futuros de paleomagnetismo y ambientales, entre otros, χ y κ_{MRA}/κ constituyen proxies magnéticos de gran utilidad que responden a las características de origen, así como los procesos que ocurren en las lagunas. Desde el punto de vista hidroquímico, se identifican fundamentalmente dos procesos que tienen lugar en las lagunas y que las diferencian entre sí: actividad biológica y evaporación. En este sentido, los valores más alcalinos de las lagunas de IJR y laguna Anónima son producto de la fotosíntesis de algas y cianobacterias presentes en las mismas; y por otro lado, las altas concentraciones iónicas disueltas y la precipitación de sales observadas en las márgenes de las lagunas de IM son consecuencia de los procesos de evaporación (régimen hídrico negativo) que ocurren en estos sistemas.

Los estudios paleomagnéticos realizados en la laguna Esmeralda y Anónima muestran que la técnica de datación por Paleointensidad relativa (PIR) es una herramienta muy promisoría en lagunas antárticas. La datación de la laguna Esmeralda se realizó mediante estudios de ^{14}C y las curvas de PIR se correlacionaron con otras PIR disponibles de la región. Las curvas de PIR de Anónima presentan valores máximos mayores que Esmeralda, no obstante, el mínimo de $\text{MRN}_{15\text{mT}}/\kappa$ en Anónima a los 68 cm se correlaciona claramente con el mínimo en Esmeralda a los 7700 años calibrados AP. Aún existen grandes incertezas con respecto al cálculo del efecto reservorio en sedimentos antárticos, no obstante, podría inferirse que los sedimentos recuperados de la Laguna Anónima contienen la información de los cambios del campo magnético terrestre para los últimos 6000-7000 años.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Universidad Nacional del Córdoba (UNC), Dirección Nacional del Antártico (DNA), GeoForschungsZentrum (GFZ Potsdam), Centro de Geociencias (UNAM) y CONICET por el apoyo financiero. Se agradece también el apoyo al Ing. J. Escalante de la UNAM (México) y al Sr. P. Zubeldia (Tec. CICPBA). Esta contribución se desarrolló con el apoyo del proyecto PICTO-2010-0096. Los autores agradecen a la Dra. A. Soler, a un revisor anónimo y

al Grupo Editorial por los comentarios y sugerencias que permitieron mejorar el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, C.E.** y **M. McElhinny**, 1981. A 10,000 years geomagnetic secular variation record from three Australian Maars. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 68:709-724.
- Battarbee, R.**, 2000. Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. *Quaternary Science Reviews* 19:107-124.
- Beckwith, P., J. Ellis, D. Revitt** y **F. Oldfield**, 1986. Heavy metal and magnetic relationships for urban source sediments. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 42:67-75.
- Bidegain, J.C., Y. Rico, A. Bartel, M.A.E. Chaparro** y **S. Jurado**, 2009. Magnetic parameters reflecting pedogenesis in pleistocene loess deposits of Argentina. *Quaternary International* 209:175-186.
- Blundell, A., J.A. Hannam, J.A. Dearing** y **J.F. Boyle**, 2009. Detecting atmospheric pollution in surface soils using magnetic measurements: a reappraisal using an England and Wales database. *Environmental Pollution* 57:2878-2890
- Böhnel, H.** y **R. Molina-Garza**, 2002. Secular variation in Mexico during the last 40,000 years. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 133:99-109
- Brachfeld, S., G.D. Acton, Y. Guyodo,** y **S.K. Banerjee**, 2000. High-resolution paleomagnetic records from Holocene sediments from the Palmer Deep, Western Antarctic Peninsula. *Earth and Planetary Science Letters* 181:429-441.
- Brachfeld, S. A., E. Domack, C. Kisel, C. Laj, A. Leventer, S. Ishman, R. Gilbert, A. Camerlenghi** y **L.B. Eglinton**, 2003. Holocene history of the Larsen-A Ice Shelf constrained by geomagnetic paleointensity dating. *Geology* 31:749-752.
- Bučko, M.S., T. Magiera, L.J. Pesonen** y **B. Janus**, 2010. Magnetic, Geochemical, and Microstructural Characteristics of Road Dust on Roadsides with Different Traffic Volumes-Case Study from Finland. *Water, Air and Soil Pollution* 209:295-306.
- Carrivick, J.L., B.J. Davies, N.F. Glasser** y **D. Nývlt**, 2012. Late Holocene changes in character and behaviour of land-terminating glaciers on James Ross Island, Antarctica. *Journal of Glaciology* 58:1176-1190.
- Chaparro, M.A.E.**, 2006. *Estudio de Parámetros Magnéticos de Distintos Ambientes Relativamente Contaminados en Argentina y Antártida*. Geofísica UNAM, México, 107 pp.
- Chaparro, M.A.E., C.S.G. Gogorza, M.A.E. Chaparro, M.A. Irurzun** y **A.M. Sinito**, 2006. Review of magnetism and pollution studies of various environments in Argentina. *Earth Planets Space* 58:1411-1422.
- Chaparro, M.A.E., H. Nuñez, J.M. Lirio, C.G.S. Gogorza** y **A.M. Sinito**, 2007. Magnetic screening and heavy metal pollution studies in soils from Marambio station, Antarctica. *Antarctic Sciences* 19:379-393.
- Chaparro, M.A.E., H.N. Böhnel, R. Byrne, N.R. Nowaczyk, R.S. Molina-Garza, J. Park** y **J.F.W. Negendank**, 2008. Paleomagnetic secular variation and rock-magnetic studies of Holocene sediments from a maar lake (Hoya de San Nicolas) in Central Mexico. *Geophysical Journal International* 175:462-476.
- Chaparro, M.A.E., M.A.E. Chaparro** y **A.M. Sinito**, 2012. An interval fuzzy model for magnetic monitoring: estimation of a pollution index. *Environmental Earth Sciences* 66:1477-1485.
- Chaparro, M.A.E., G. Suresh, M.A.E. Chaparro, V. Ramasamy**

- A.M. Sinito, 2013a. Magnetic studies and elemental analysis of river sediments: A case study from the Ponnaiyar River (southeastern India). *Environmental Earth Sciences* 70:201-213.
- Chaparro, M.A.E., J. Lavornia, M.A.E. Chaparro y A.M. Sinito, 2013b. Biomonitoring of urban air pollution: Magnetic studies and SEM observations of corticolous foliose and microfoliose lichens and their suitability for magnetic monitoring. *Environmental Pollution* 172:61-69.
- Chaparro, M.A.E., N. Krishnamoorthy, M.A.E. Chaparro, Karina L. Lecomte, S. Mullainathan, R. Mehra y Ana M. Sinito, 2015. Magnetic, chemical and radionuclide studies of river sediments and their variation with different physiographic regions of Bharathapuzha River, southwestern India. *Studia Geophysica et Geodaetica* DOI: 10.1007/s11200-014-0145-6.
- Cohen, A.S., 2003. *Paleolimnology: The history and evolution of lake systems*. Oxford University Press, New York, 500 pp.
- Creer, K.M., 1974. Geomagnetic variations for the interval 7,000-25,000 BP as recorded in a core of sediments from station 1474 of the Block Sea cruise of Atlantic II. *Earth and Planetary Science Letters* 23:34-42.
- Creer, K.M., D.A. Valencio, A.M. Sinito, P. Tucholka y J.F. Vilas, 1983. Geomagnetic secular variations 0-14,000 year BP as recorded by lake sediments from Argentina. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 74:109-222.
- Dearing, J., 1999. Magnetic susceptibility. En J. Walden, F. Oldfield y J. Smith (Eds.), *Environmental magnetism: a practical guide. Technical guide, No. 6*. Quaternary Research Association, London:35-62.
- Desenfant, F., E. Petrovský y P. Rochette, 2004. Magnetic signature of industrial pollution of stream sediments and correlation with heavy metals: case study from South France. *Water, Air and Soil Pollution* 152:297-312.
- Doran, P.T., G.W. Berger, W.B. Lyons, R.A. Wharton Jr, M.L. Davisson, J. Southon y J.E. Dibb, 1999. Dating Quaternary lacustrine sediments in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 147:223-239.
- Dunlop, D., 2002. Theory and application of the Day plot (M_s/M_r versus H_c/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysics Research* 107(B3), doi:10.1029/2001JB000486.
- Elmore, R.D., A.R. Muxworthy y M.M. Aldana, 2012. Remagnetization and Chemical Alteration of Sedimentary Rocks. En R.D. Elmore, A.R. Muxworthy, M.M. Aldana y M. Mena (Eds.), *Remagnetization and Chemical Alteration of Sedimentary Rocks*. Geological Society, London, Special Publications 371:1-21.
- Evans, M.E. y F. Heller, 2003. *Environmental magnetism, Principles and applications of environmental magnetism*, Academic Press. An imprint of Elsevier Science, New York, 299 pp.
- Everitt B. y T. Hothorn, 2011. *An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R*. Springer. New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 283 pp.
- Geiss, C.E., C.E. Umbanhowar, P. Camill y S.K. Banerjee, 2003. Sediment magnetic properties reveal Holocene climate change along the Minnesota prairie-forest ecotone. *Journal of Paleolimnology* 30:151-166
- Gogorza, C.S.G., M.A. Irurzun, A.M. Sinito, A. Lisé-Pronovost, G. St-Onge, T. Haberzettl, C. Ohlendorf, S. Kastner y B. Zolitschka, 2012. High-resolution paleomagnetic records from Laguna Potrok Aike (Patagonia, Argentina) for the last 16,000 yrs. *Geochemistry, Geophysics. Geosystems* 13:Q12Z37, doi:10.1029/2011GC003900.
- Gubbins, D. y E. Herrero-Bervera, 2007. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1054 pp.
- Hanesch, M., H. Stanjek y N. Petersen, 2006. Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: the role of organic carbon. *Geophysics Journal International* 165:53-61.
- Heiri O., A.F. Lotter y G. Lemcke, 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology* 25:101-110.
- Hunt, A., J. Jones y F. Oldfield, 1984. Magnetic measurements and heavy metals in atmospheric particulates of anthropogenic origin. *Sciences of the Total Environment* 33:129-139.
- Hunt, C.P., B.M. Moskowitz y S.K. Banerjee, 1995. Magnetic properties of rocks and minerals. En T.J. Ahrens (Ed.), *Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*. American Geophysical Union, Washington D.C., 3:189-204.
- Ingólfsson, Ó., C. Hjort, P.A. Berkman, S. Björck, E. Colhoun, I.D. Goodwin, B. Hall, K. Hirakawa, M. Melles, P. Moller y M.L. Prentice, 1998. Antarctic glacial history since the Last Glacial Maximum: an overview of the record on land. *Antarctic Science* 10:326-44.
- Irurzun, M.A., C.S.G. Gogorza, A.M. Sinito, J.M. Lirio, H. Nuñez y Chaparro, M.A.E., 2006. Paleosecular Variations Recorded by Holocene-Pleistocene Sediments from El Trébol Lake (Argentina). *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 154:1-17.
- Irurzun, M.A., M.A.E. Chaparro, A.M. Sinito, C.S.G. Gogorza, J.M. Lirio, H. Nuñez, N.R. Nowaczyk y H.N. Böhnell, 2013. Preliminary relative palaeointensity record and chronology on sedimentary cores from Lake Esmeralda (Vega Island, Antarctica). *Latimag Letters* 3, 6 pp.
- Irurzun, M.A., C.S.G. Gogorza, A.M. Sinito, M.A.E. Chaparro, A. Prieto, C. Laprida, J.M. Lirio, A. Navas y H. Nuñez, 2014a. A high resolution palaeoclimate record for the last 4800 cal. years BP on Lake La Brava SE Pampas plains, Argentina. *Geofísica Internacional* 53:365-383.
- Irurzun M.A., G. González Bonorino, C.S.G. Gogorza, S. Hall, L. Abascal, R.N. Alonso y N. Larcher, 2014b. Caracterización Magnética y Datación Preliminar Mediante Paleointensidades Relativas de Sedimentos Lacustres de la Formación Tajamar (Guachipas), Salta, Argentina. *Latinmag Letters* 4:1-18 (LL14-0404Rs).
- King, J., S.K. Banerjee, J. Marvin y Ö. Özdemir, 1982. A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: Some results from lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 59:404-419.
- Knab, M., V. Hoffmann, E. Petrovský, A. Kapicka, N. Jordanova y E. Appel, 2006. Surveying the anthropogenic impact of the Moldau river sediments and nearby soils using magnetic susceptibility. *Environmental Geology* 49:527-535.
- Kravchinsky, V., M.A. Krainov, M.E. Evans, J.A. Peck, J.W. King, M.I. Kuzmin, H. Sakai, T. Kawai y D.F. Williams, 2003. Magnetic record of Lake Baikal sediments: chronological and paleoclimatic implication for the last 6.7 Myr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 195:281-298.
- Lascu, I. y C. Plank, 2013. A new dimension to sediment magnetism: Charting the spatial variability of magnetic properties across lake basins. *Global and Planetary Change* 110:340-349.
- Last, W.M., 2002. Geolimnology of salt lakes. *Geosciences Journal*

- 6:347-36.
- Last, W.M. y J.P. Smol**, 2001. *Tracking Environmental Change using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research Series*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 548 pp.
- Le Borgne, E.**, 1955. Susceptibilité magnétique anormal du sol superficiel, *Annales de Géophysique* 11:399-419.
- Lebart, L., A. Morineau y M. Piron**, 1995. *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. Dunod, Paris.
- Lisé-Pronovost, A., G. St-Onge, C. Gogorza, T. Habertzettl, M. Preda, P. Kliem, P. Francus, B. Zolitschka y The PASADO Science Team**, 2013. High-resolution paleomagnetic secular variations and relative paleointensity since the Late Pleistocene in southern South America. *Quaternary Science Reviews* 71:91-108.
- Liu, Q., A. P. Roberts, J. C. Larrasoana, S. K. Banerjee, Y. Guyodo, L. Tauxe y F. Oldfield**, 2012. Environmental magnetism: Principles and applications. *Review of Geophysics* 50, RG4002, doi:10.1029/2012RG000393.
- Lund, S.P., L. Stoot, M. Schwartz, R. Thunell y A. Chen**, 2006. Holocene paleomagnetic secular variation records from the western Equatorial Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters* 246:381-392.
- Magiera, T., Z. Strzyszcz, A. Kapicka, E. Petrovský y MAGPROX Team**, 2006. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. *Geoderma* 130:299-311.
- Maher, B.**, 1986. Characterisation of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 42:76-92.
- Maher, B.A. y R. Thompson**, 1999. *Quaternary Climate, Environments and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, 390 pp.
- Maher, B.A., R. Thompson y M.W. Hounslow**, 1999. Introduction. En B.A. Maher y R. Thompson (Eds.), *Quaternary Climate, Environments and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, 1-48.
- Marié, D.C., M.A.E. Chaparro, C.S.G. Gogorza, A. Navas y A.M. Sinito**, 2010. Vehicle-derived emissions and pollution on the road Autovía 2 investigated by rock-magnetic parameters: a case of study from Argentina. *Studia Geophysica Geodaetica* 54:135-152.
- Mena, M. y A.M. Walther**, 2012. Rock magnetic properties of drill cutting from a hydrocarbon exploratory well and their relationship to hydrocarbon presence and petrophysical properties. En R.D. Elmore, A.R. Muxworthy, M. Aldana y M. Mena (Eds.), *Remagnetization and Chemical Alteration of Sedimentary Rocks*. Geological Society, London, Special Publications, 371:217-228.
- Mullins, C.E.**, 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science, a review. *European Journal of Soil Sciences* 28:223-246.
- Nedbalova, L., D. Nývlt, J. Kopacek, M. Sobr y J. Elster**, 2012. Freshwater lakes of Ulu Peninsula, James Ross Island, north-east Antarctic Peninsula: origin, geomorphology and physical and chemical limnology. *Antarctic Science* 25:358-372.
- Oldfield, F., R.C. Chiverrell, R. Lyons, E. Williams, Z. Shen, C. Bristow, J. Bloemendal, J. Torrent y J.F. Boyle**, 2014. Discriminating dusts and dusts sources using magnetic properties and hematite:Goethite ratios of surface materials and dust from North Africa, the Atlantic and Barbados. *Aeolian Research* 13:91-104.
- Peralta A., V. Costanzo-Alvarez, E. Carrillo, L. Evert Durán, M. Aldana y D. Rey**, 2013. Numerical relationships between magnetic parameters measured in quaternary sediments, and global paleoclimatic proxies. *Latinmag Letters* 3 OB05:1-7.
- Peters C. y M. Dekkers**, 2003. Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. *Physics and Chemistry of the Earth* 28:659-667.
- Piper, A.M.**, 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union Transactions* 25:914-923.
- Quijano, L., M.A.E. Chaparro, D.C. Marié, L. Gaspar y A. Navas**, 2014. Relevant magnetic and soil parameters as potential indicators of the soil conservation status in Mediterranean agroecosystems. *Geophysical Journal International* 198:1805-1817.
- Rijal, M.L., E. Appel, E. Petrovsky y U. Blaha**, 2010. Change of magnetic properties due to fluctuations of hydrocarbon contaminated groundwater in unconsolidated sediments. *Environmental Pollution* 158:1756-1762.
- Skácelová, K., M. Barták, P. Coufalík, D. Nývlt y K. Trnková**, 2013. Biodiversity of freshwater algae and cyanobacteria on deglaciated northern part of James Ross Island, Antarctica. A preliminary study. *Czech Polar Reports* 3:93-106.
- Snowball, I., P. Sandgren y G. Petterson**, 1999. The mineral magnetic properties of an annually laminated Holocene lake-sediment sequence in northern Sweden. *The Holocene* 9:353-362.
- Snowball, I., L. Zillen y P. Sandgren**, 2002. Bacterial magnetite in Swedish varved lake sediments; a potential bio-marker of environmental change. *Quaternary International* 88:13-19.
- Stoner, J. S., C. Laj, J.E.T. Channell y C. Kissel**, 2002. South Atlantic and North Atlantic geomagnetic paleointensity stacks (0–80 ka): implications for inter-hemispheric correlation. *Quaternary Science Reviews* 21:1141-1151.
- Tauxe, L.**, 1998. *Paleomagnetic principles and practice*. Kluwer Academic Publishers. Boston, 299 pp.
- Thompson, R. y F. Oldfield**, 1986. *Environmental magnetism*. Allen & Unwin (Publishers) Ltd., London, 225 pp.
- Thompson, R., J.C. Stober, G.M. Turner, F. Oldfield, J. Bloemendal, J.A. Dearing y T.A. Rummery**, 1980. Environmental applications of magnetic measurements. *Science* 207:481-486.
- Tite, M.S. y R.E. Linington**, 1975. Effect of climate on the magnetic susceptibility of soils. *Nature* 256:565-566.
- Torrent, J., Q.S. Liu y V. Barrón**, 2010. Magnetic minerals in Calcic Luvisols (Chromic) developed in a warm Mediterranean region of Spain: Origin and paleoenvironmental significance. *Geoderma* 154:465-472.
- Williams, T.**, 1994. *Palaeomagnetic and magnetic records for the last 300,000 years from Lac du Bouchet, France: applications to geomagnetism and the environment*. PhD thesis. University of Edinburgh.
- Willmott, V., E.W. Domack, M. Canals y S. Brachfeld**, 2006. A high resolution paleointensity record from the Gerlache-Boyd paleo-ice stream region, northern Antarctic Peninsula. *Quaternary Research* 66:1-11
- Wilson, G.S., F. Florindo, L. Sagnotti, C. Ohneiser y the ANDRILL-MIS Science Team**, 2007. Palaeomagnetism of the AND-1B Core, ANDRILL McMurdo Ice Shelf Project, Antarctica. *Terra Antarctica* 14:289-296.
- Yang, T., Q. Liu, L. Chan y Z. Liu**, 2007. Magnetic signature of heavy metal pollution of sediments: case study from the East Lake in Wuhan, China. *Environmental Geology* 52:1639-1650.

Yang, X., F. Heller, J. Yang y Z. Su, 2009. Paleosecular variations since ~ 9000 yr BP as recorded by sediments from maar lake Shuangchiling, Hainan, South China. *Earth and Planetary Science Letters* 288:1-9.

Zhang, C., Q. Qiao, J.D.A. Piper y B.B. Huang, 2011. Assessment of heavy metal pollution from a Fe-smelting plant in urban river sediments using environmental magnetic and geochemical methods. *Environmental Pollution* 159:3057-3070.

Apéndice 1. Resumen de parámetros y gráficos empleados usualmente en magnetismo ambiental.
Appendix 1. Parameters and plots often used in Environmental Magnetism.

Parámetro	Descripción	Unidades	Interpretación magnética
κ	Susceptibilidad magnética volumétrica	SI	Concentración de minerales magnéticos
χ	Susceptibilidad magnética específica	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	Concentración de minerales magnéticos
$\kappa_{\text{FD}}\%$	Susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia	%	Presencia de minerales superparamagnéticos magnetita ultrafina ($<0,03\mu\text{m}$)
MRA	Magnetización remanente anhistérica	$\text{A m}^2 \text{kg}^{-1}$	Concentración de minerales ferromagnéticos y presencia de ferrimagnéticos finos
κ_{MRA}	Susceptibilidad anhistérica volumétrica	SI	Presencia y concentración de magnetita fina ($<0,2\mu\text{m}$)
χ_{MRA}	Susceptibilidad anhistérica específica	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	Presencia y concentración de magnetita fina ($<0,2\mu\text{m}$)
$\kappa_{\text{MRA}}/\kappa$ -ratio	Cociente de susceptibilidades	adimensional	Presencia de magnetita fina ($<0,2\mu\text{m}$)
MRA/MRIS	Cociente de magnetizaciones de remanencia	adimensional	Indicador de tamaño de granos magnéticos
MRIS	Magnetización remanente isotérmica de saturación	$\text{A m}^2 \text{kg}^{-1}$	Concentración de minerales ferromagnéticos
H_{cr}	Coercitividad de remanencia	mT	Identificación de minerales magnéticos
S-ratio	Cociente entre MRIS ₃₀₀ y la MRIS	adimensional	Relación entre minerales ferrimagnéticos (“blandos”) y antiferromagnéticos (“duros”)
MRIS/ χ	Cociente entre la MRIS y la susceptibilidad magnética específica	A m^{-1}	Indicador de tamaño de grano o mineralogía magnética
Ms	Magnetización de saturación	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	Concentración de minerales para y ferromagnéticos
H_{c}	Fuerza coercitiva	mT	Identificación de minerales magnéticos
K(T)	Susceptibilidad dependiente de la temperatura	SI	Identificación de minerales magnéticos
M(T)	Magnetización dependiente de la temperatura	A m^{-1}	Identificación de minerales magnéticos
<i>Gráficos Asociados</i>			
Gráfico de King	Representación de la κ_{MRA} vs κ , rectas de calibración	SI	Distribución de tamaño de granos magnéticos (magnetita)
Gráfico de Thompson	Representación de la κ vs MRIS, rectas de calibración	SI, A m^{-1}	Concentración y tamaño de grano de magnetita
Gráfico de Day	Representación de Mr/Ms vs $H_{\text{cr}}/H_{\text{c}}$, curvas de calibración	adimensional	Distribución de dominios magnéticos
Curvas de K-T	Curvas de susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura	SI, °C	Identificación de minerales magnéticos, transiciones entre fases magnéticas
Curvas de M-T	Curvas de magnetización dependiente de la temperatura	A m^{-1} , °C	Identificación de fases magnéticas