



## PROPIEDADES MAGNÉTICAS DEL SUSTRATO DEL SALAR DE CARCOTE (ALTIPLANO ANDINO) COMO PARÁMETROS ESENCIALES PARA EL ENTENDIMIENTO DE LA PROCEDENCIA SEDIMENTARIA.

A. Flores<sup>1\*</sup>, H. Pizarro<sup>1</sup>, J. Luque<sup>1</sup>, A. Aranguiz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.

\*e-mail: [abraham.flores.varas@gmail.com](mailto:abraham.flores.varas@gmail.com)

### ABSTRACT

Carcote Salar is located in the Andean highlands, in which many processes (natural and anthropic) that modulate the system are recorded in sediments. One approach to study sediment properties is through the analysis of its magnetic properties, such as susceptibility and magnetic hysteresis. In this work, we sampled sediments from different springs in Carcote Salar and was determined that the main mineral phases identified in the salar are due to weathering of andesitic volcanic rocks. They are mainly paramagnetic type minerals such as clinopyroxenes, amphibols, biotites and chlorites, according to the low susceptibility values. Frequency dependent susceptibility measurements indicated a great contribution of superparamagnetic (SP) particles. The hysteresis cycles show abundance of single-domain (SD), pseudo-single-domain (PSD) and SP particles, indicating a great abundance of very small particles, being magnetite the main magnetic mineral. It is interpreted that the main magnetic minerals come from the weathering of the surrounding rocks that are transported by water flows or by wind action and that the endogenous magnetic phases of the salt flat are practically absent.

**Keywords:** Salar, Geomagnetism, Susceptibility, Hysteresis loop.

### RESUMEN

El Salar de Carcote está localizado en el altiplano andino, en el cual muchos procesos (natural o antrópico) que modelan el sistema son registradas en el sedimento. Una aproximación al estudio de las propiedades del sedimento es a través del análisis de sus propiedades magnéticas, tales como la susceptibilidad e histéresis magnética. En este trabajo, muestreamos sedimento de diferentes manantiales del Salar de Carcote y se determinó que las principales fases minerales identificadas en el salar provienen de la meteorización de las rocas volcánicas andesíticas. Las fases minerales son principalmente paramagnéticas como clinopiroxenos, anfíboles, biotitas y cloritas, considerando los valores bajos de susceptibilidad. La susceptibilidad dependiente de la frecuencia indicó un gran aporte de partículas SP. Los ciclos de histéresis muestran abundancia de partículas SD, PSD y SP, indicando una gran abundancia de partículas muy pequeñas, donde el principal mineral magnético es la magnetita. De esta forma, los principales minerales magnéticos son provenientes de la meteorización de las rocas aledañas que son transportados por flujos de agua o por acción eólica y que las fases magnéticas endógenas del salar son prácticamente ausentes.

**Palabras clave:** Salar, Geomagnetismo, Susceptibilidad, Histéresis.

### 1. Introducción

Los salares son ambientes hidrológicos comunes en el norte de Chile, particularmente en la Cordillera de los Andes. Estos se desarrollan por surgencias de fuentes subterráneas. Se caracterizan por bajas precipitaciones y alta evaporación, provocando un movimiento capilar ascendente de las aguas subterráneas, induciendo la saturación y la precipitación de minerales, lo que favorece la formación de una costra salina (Last, 2002). Por lo tanto, estos sistemas son dependientes de las condiciones climáticas del entorno, las que modulan la interacción de distintos procesos dentro del salar. Tales procesos son registrados constantemente en los sedimentos, por lo que su comprensión es esencial para entender el sistema (Battarbee, 2000). Existen muchas herramientas de análisis que ayudan a comprender estos procesos, una de ellas es el análisis de las propiedades



magnéticas en sedimentos, principalmente mediciones de susceptibilidad e histéresis magnética, con las que se puede comprender la procedencia del material, génesis, granulometría, composición y concentración. A través del estudio de las propiedades magnéticas del sedimento se pueden inferir los procesos que han interactuado en el sistema, y así contribuir para un mejor entendimiento de las condiciones climáticas a las que ha sido sometido el Salar.

## 2. Objetivos

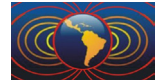
A partir de los sedimentos extraídos del salar de Carcote, determinar la procedencia, génesis, composición y concentración del material sedimentario magnético, a través de los análisis de susceptibilidad magnética y ciclos de histéresis, con el fin de poder determinar los principales procesos que han interactuado en el salar.

## 3. Marco teórico

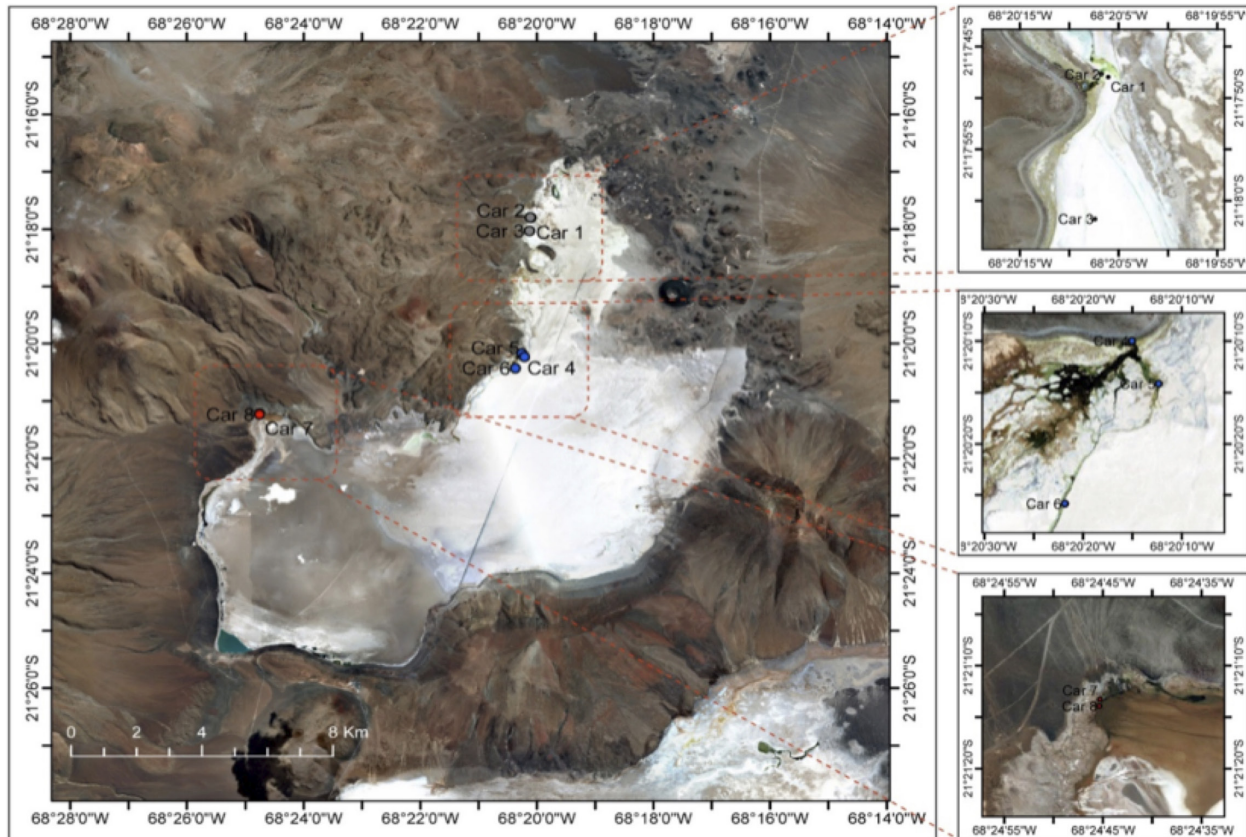
El salar de Carcote se ubica en las proximidades de estructuras volcánicas, principalmente los volcanes Ollagüe y Aucanquilcha, y se presenta como facies distales tipo playa en depósitos aluviales. El salar se originó por surgencias de agua en superficie debido a la proximidad de fuentes subterráneas. La alta evaporación causa la saturación química del agua, permitiendo la precipitación de minerales que forman la costra (Mardones y Pereira, 1991; Last, 2002). La constante interacción entre los cuerpos de agua y el sedimento es un factor que permite la formación de minerales de origen endógeno, alogénico y/o autigénico (Last, 2002). La caracterización del material formado es necesaria para un mejor entendimiento de los procesos dominantes ocurridos en el salar. Para esto realizamos un estudio de las principales propiedades magnéticas del sustrato con el propósito de determinar la proveniencia del material sedimentario magnético. Implementamos dos técnicas para determinar las propiedades magnéticas, la susceptibilidad y los ciclos de histéresis. La susceptibilidad es la capacidad de una sustancia para adquirir magnetismo de las cuales se pueden medir de forma volumétrica ( $K=M/H$ ) o másica ( $X= k/p$ ) (Evans y Heller, 2003). La magnitud de la susceptibilidad está cuantificada según el tipo de mineral magnético (diamagnético, paramagnético o Ferromagnético), descritas por Lanza y Meloni (2006). Las partículas ferromagnéticas se dividen en pequeñas regiones de magnetización uniforme, pero difieren dentro del mismo grano. Estas regiones son los *dominios magnéticos*. Si una partícula ferromagnética presenta muchos dominios se denomina multidominio (MD). Si solo presenta un dominio es de dominio-simple (SD). Si una partícula presenta muchos dominios (MD), pero se comporta como SD, se les denomina pseudo dominio-simple (PSD). Otro tipo de partícula son la superparamagnéticas (SP), con un comportamiento similar a SD, pero su remanencia desaparece al extraer el campo inducido (Evans y Heller, 2003). Existe una relación entre los dominios magnéticos y los tamaños de grano, descritas por Evans y Heller (2003) y Lanza y Meloni (2006). La susceptibilidad dependiente de la frecuencia es un parámetro que permite estimar la abundancia de partículas pequeñas (SP). Los ciclos de histéresis, descritos por Tauxe (1998) y Evans y Heller (2003), permiten caracterizar las partículas presentes en forma simultánea además de sus tamaños, a través de cada geometría observada.

## 4. Metodologías

En el Salar se extrajeron 8 muestras de la parte norte de la cuenca de 3 sectores distintos, las cuales fueron analizadas en laboratorio (Figura 1). Para esto se emplearon dos técnicas para medir las propiedades magnéticas presentes, la susceptibilidad e histéresis magnética. Para la primera se utilizó el equipo *Kappabridge ltd.* AGICO, Puente de susceptibilidad de tres frecuencias, ingresando aproximadamente 1 gr de sedimento en un recipiente cúbico. Antes de iniciar cualquier medición se calibró el equipo mediante un estándar sintético para cada frecuencia, además del *holder* o soporte de muestra. De estos se obtienen mediciones de susceptibilidad volumétrica ( $k$ ) en baja y alta frecuencia, el cual fueron convertidos susceptibilidad de masa específica ( $\chi$ ). La histéresis fue medida mediante el equipo AGM 2900 *princeton magnetic*, magnetómetro



de gradientes alternos, donde el sedimento se prepara en una placa de dimensiones 6x5 mm. Antes de iniciar la construcción de las curvas de histéresis, se calibró con una esfera YIG de histéresis conocida. Al tener preparado esto, se inició la medición con una magnitud de 1 tesla para iniciar la construcción de las curvas



**Figura 1.** Estaciones de control de extracción de sedimento del Salar.

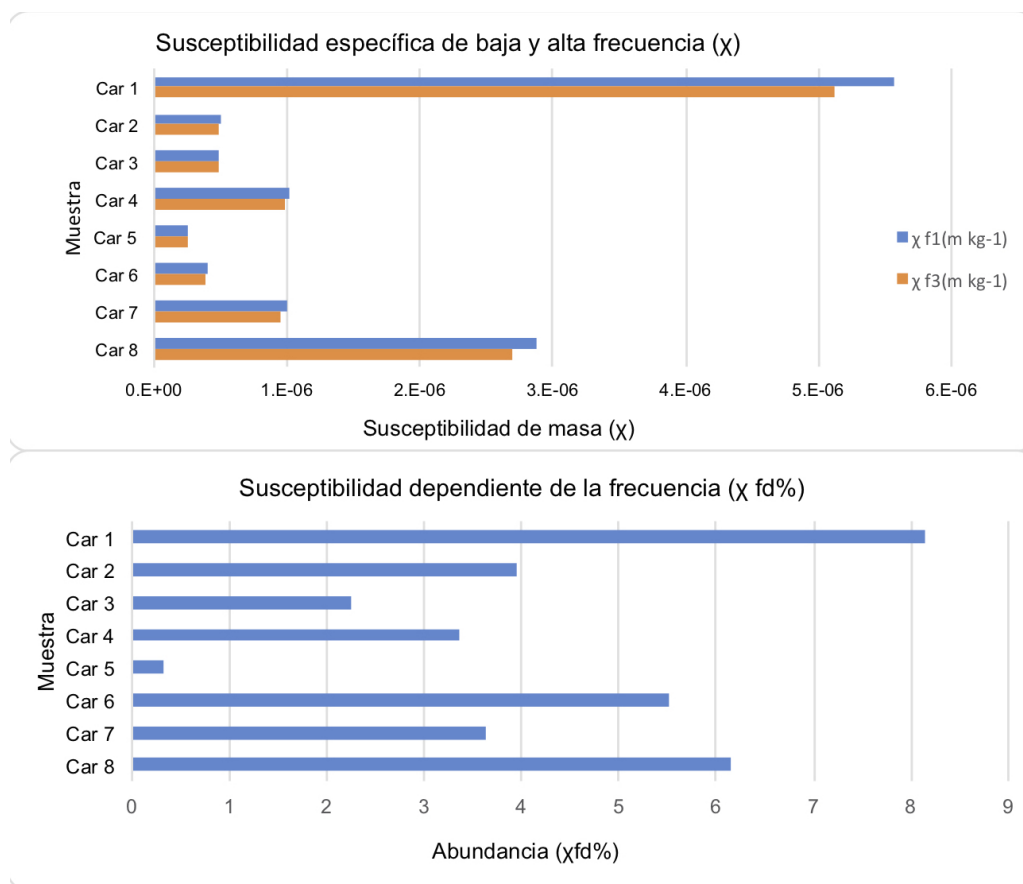
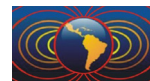
de histéresis.

## 5. Resultados

Para un mejor entendimiento, las muestras han sido agrupadas en 3 grupos según la cercanía de los puntos de muestreo, de esta manera el Grupo 1 comprende las muestras CAR 1-2-3; el Grupo 2, las muestras CAR 4-5-6 y, el Grupo 3 incluye la muestra CAR 7-8. Una vez realizadas las técnicas, es primordial una revisión general de los datos para su análisis.

En cuanto a la susceptibilidad de masa ( $\chi$ ), los valores obtenidos se detallan en la Figura 2 (superior). Se puede notar que los sedimentos asociados al Grupo 1 en el inicio de la cuenca presenta una mayor susceptibilidad desde  $5.56E-6$  [ $m\ kg^{-1}$ ] en el perímetro y desciende hasta los  $0.48E-6$  [ $m\ kg^{-1}$ ] hacia el centro del salar. Algo similar ocurre con el Grupo 2 pero de menor magnitud, donde en el borde de la cuenca toma valores desde  $0.98E-6$  [ $m\ kg^{-1}$ ] hasta los  $0.38E-6$  [ $m\ kg^{-1}$ ]. En el Grupo 3 existe un comportamiento distinto a los otros grupos, debido a que no existe una tendencia clara de los sedimentos. A pesar de esto, todos los valores en las muestras son relativamente bajos.

Los valores de susceptibilidad dependiente de la frecuencia ( $\chi\ fd\%$ ) (Figura 2 inferior), se obtiene de la formula  $((xf1 - xf3) / xf1) * 100$ . En las muestras del Grupo 1 existe mayor contenido de partículas pequeñas SP en zonas proximales (8%) y va disminuyendo en las zonas más distales del sistema (2%). En el Grupo 2,



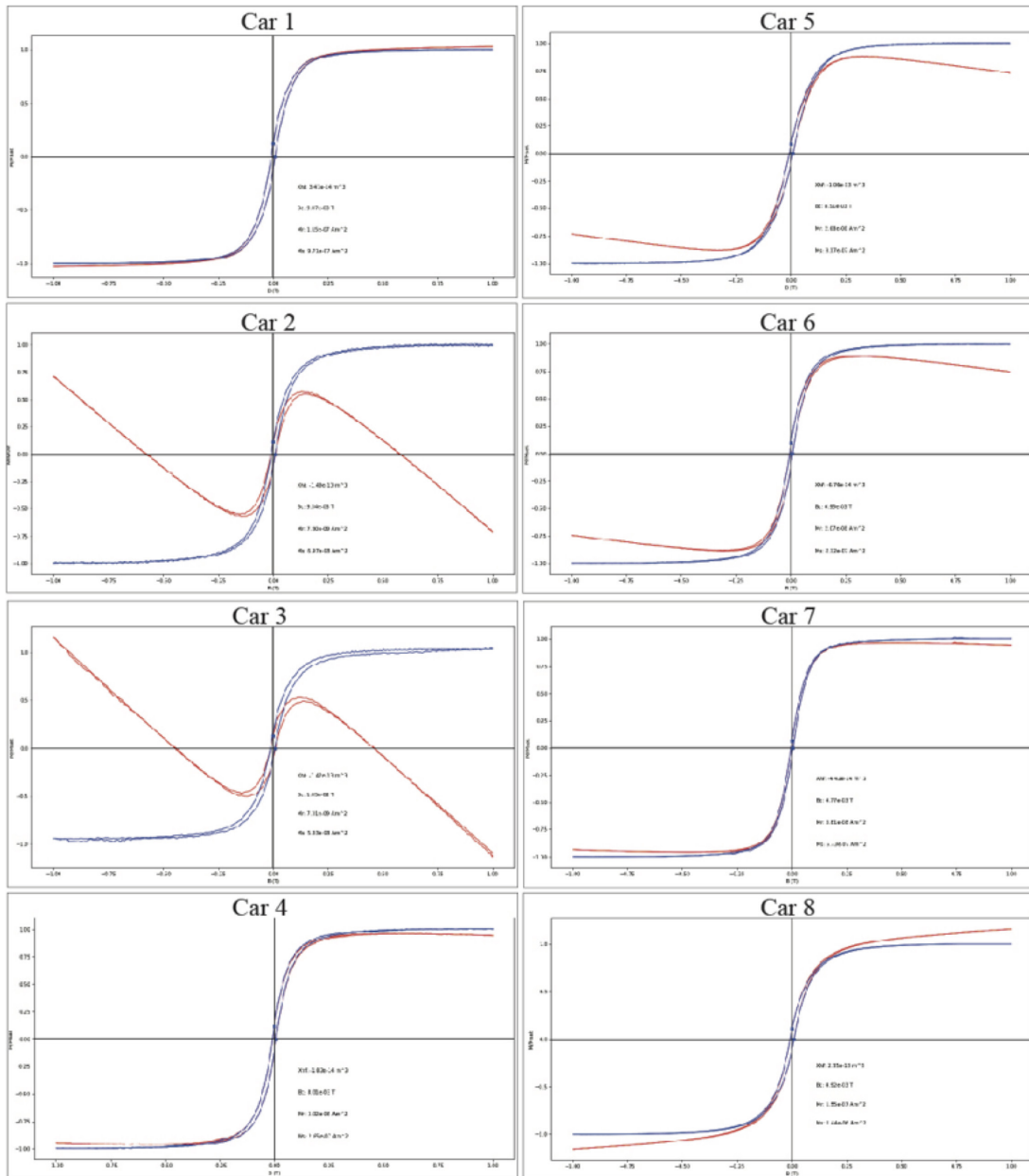
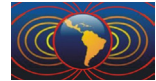
**Figura 2.** El gráfico superior detalla las mediciones de Susceptibilidad específica ( $\chi$ ) de alta y baja frecuencia de los sedimentos del Salar. El gráfico inferior muestra la Susceptibilidad dependiente de la frecuencia ( $\chi_{fd}\%$ ).

toma una tendencia similar, sin embargo, la muestra CAR 6 hay un aumento hasta el 5%. El Grupo 3 toma valores de 3.5 a 6%, con una alta abundancia en partículas SP.

Los ciclos de histéresis se detallan en la Figura 3, donde se muestran dos curvas. La roja representa la medición inicial incluyendo todas las fases minerales presentes, y la azul es la corrección debido a las fases diamagnéticas. El Grupo 1 presenta una forma elongada y constreñida en todas las muestras, sin embargo, en fases más distales las curvas rojas toman una orientación curvada. Lo mismo ocurre en el Grupo 2, pero con curvatura menos pronunciada. El Grupo 3 tienen un aspecto similar a las del Grupo 1 (específicamente la CAR 1).

## 6. Conclusiones

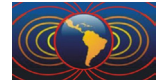
Existen características particulares que varían hacia las fases de salar tanto en susceptibilidad e histéresis magnética. El Grupo 1, la susceptibilidad disminuye hacia zonas más distales, sin embargo, los valores en general son bajos. De esto inferimos fases minerales paramagnéticas como clinopiroxeno, anfíbol, biotitas y/o clorititas en principio, pero en facies distales, las susceptibilidades son más bajas, tomando fases como Clinopiroxenos y anfíboles, con una alta abundancia en partículas SP que muestras la misma tendencia. Por otra parte, la histéresis magnética muestra abundantes partículas SP, junto con SD y PSD correspondientes a magnetitas muy finas. Por lo tanto, inferimos un material detrítico aluvial de granulometría heterogénea, proveniente de la erosión de estructuras volcánicas andesíticas donde son típicos los minerales nombrados. En zonas distales empieza la predominancia de facies salinas diamagnéticas, deformando la curva de



**Figura 3.** Ciclo de histéresis de los sedimentos del salar. El eje X representa el campo magnético inducido (H) a un Tesla y el eje Y la magnetización inducida (Ji) por el campo. Ambos ejes fluctúan desde valores -1 a 1. La curva roja representa los valores iniciales de medición y la curva azul la corrección del material diamagnético presente.

histéresis, donde el principal mineral magnético es la magnetita. En general, el material presenta partículas muy pequeñas paramagnéticas y ferromagnéticas, siendo menos abundantes hacia el salar.

El Grupo 2 presenta características muy similares al anterior. Las variaciones de susceptibilidad siguen la misma tendencia, pero de menor diferencia. Las susceptibilidades son muy bajas, característico de fases paramagnéticas como clinopiroxeno, moscovitas y cloritas, con alta abundancia de partículas SP, considerablemente altas en puntos distales. Los ciclos de histéresis tienen formas similares al Grupo 1, donde existen partículas SD, PSD y SP simultáneamente con magnetitas muy finas. De esta manera, las facies detríticas aluviales presentan abundantes minerales paramagnéticos. En facies distales dominan los minerales diamagnéticos salinos. El principal mineral magnéticos es la magnetita con tamaños SD a



PSD, detectada por la histéresis magnética. El aumento de partículas SP en fases distales, se atribuye a la considerable acción eólica, transportando aquellos sedimentos más finos.

Finalmente, en el Grupo 3, la susceptibilidad es similar a los anteriores, con dominancia de fases paramagnéticas de tamaño fino, con alta abundancia en partículas SD, PSD y SP. La cercanía de estas muestras al borde de cuenca indica influencia de aportes fluviales, pero además de una fuerte influencia eólica, debido a la dominancia de partículas finas que son provenientes de rocas volcánicas aledañas, donde la magnetita es el principal mineral magnético.

Notamos que los principales minerales magnéticos del salar de Carcote son de origen alogénico, transportados y depositados dentro de la cuenca por flujos o aportes eólicos, donde las fases magnéticas endógenas del salar son ausentes. Por otra parte, es recomendable la realización de mediciones de temperaturas de Curie, de manera de precisar la identificación de fases magnéticas y consolidar la investigación. Las mediciones de susceptibilidad sugieren que las muestras CAR 1-6-8 son buenas propuestas para la implementación de esta técnica. Se debe considerar que una adecuada combinación de distintos parámetros magnéticos permite obtener mejores interpretaciones en cuanto a las propiedades magnéticas de las rocas.

## Referencias

- Battarbee, R. W., 2000. Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. *Quaternary science reviews* 19, 2000, 107-124.
- Bartel, A. A., Bidegain, J. C., & Sinito, A. M., 2005. Propiedades magnéticas de diferentes suelos del partido de La Plata, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60, 3, 591-598.
- Butler, R. F., 1998. Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes. Electronic edition, Portland, Oregon, 31-39 pp.
- Evans M. E., Heller F., 2003. Environmental Magnetism: Principle and Applications of Enviromagnetics, Elsevier Science (USA). 7-14.
- Lanza, R. y Meloni, A. 2006. The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Alemania, 67-92.
- Last, W. M., 2002. Geolimnology of salt lakes. *Geosciences Journal* 6, 4, 347-369.
- Mardones L., Pereira M., 1991. Antecedentes geológicos de los salares de Ascotán y Carcote, Congreso geológico de Chile, 838-841, Viña del Mar, 5 agosto-5.
- Tauxe, L. 1998. Paleomagnetic Principles and Practice: Modern Approaches in Geophysics, Advisory Board, 35-47.