

# SEÑAL MAGNÉTICA EN SUELOS DEL CENTRO DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

Mauro L. Gómez Samus<sup>1,2,3</sup>, Yamile Rico<sup>1,3,4</sup>, Juan C. Bidegain<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT). Calle 52 S/N. La Plata.  
gomez\_samus@yahoo.com.ar

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM-UNLP).

<sup>4</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC).

## ARTICLE INFO

### Article history

Received October 15, 2016

Accepted March 13, 2017

Available online March 21, 2017

### Handling Editor

Diana Cuadrado

### Keywords

Suelos

Magnetismo Ambiental

Cuaternario

Loess

Tandilia

## RESUMEN

Dado que los parámetros magnéticos proporcionan información acerca del tipo, abundancia y tamaño de grano de los minerales magnéticos, es posible utilizarlos para la interpretación de procesos sedimentarios y pedogenéticos. El objetivo del presente trabajo es caracterizar la señal magnética de los suelos que se desarrollan a partir del loess del Pleistoceno – Holoceno en el centro de la provincia de Buenos Aires, en el sector de Tandilia. El área de estudio ocupa un lugar intermedio entre zonas donde existen estudios de magnetismo ambiental, como el norte y el sur de la provincia de Buenos Aires. Esto permite realizar comparaciones que propenden a la elaboración de un modelo magnético regional para los suelos de la región pampeana. Los perfiles de suelos analizados han sido clasificados como Argiudol típico, Hapludol típico y Hapludol petrocálcico. Los minerales que dominan la señal magnética corresponden en todos los casos a especies ferrimagnéticas, del tipo magnetita-titanomagnetitas-maghemita. Las técnicas empleadas indican dominio de granos magnéticos de diámetro inferior a 1  $\mu\text{m}$ , principalmente Dominio Simple (DS). La concentración de estos minerales en el material parental de los suelos analizados difiere de la del material parental de los suelos de otros sectores de la provincia; es más elevada que la del norte y más baja que la del sur. Posiblemente, este patrón tiene una estrecha vinculación con la procedencia sedimentaria, con mayor cantidad de titanomagnetitas hacia el área fuente, ubicada al sudoeste. Los valores más elevados de susceptibilidad magnética se registran en los horizontes A y B, debido a un enriquecimiento en partículas magnéticas de tamaños de grano ultrafino (SP) a fino (DS) por efecto de la pedogénesis. Los valores de coercitividad de la remanencia disminuyen en dichos horizontes, de manera que la incorporación pedogenética de partículas magnéticas correspondería a especies de baja coercitividad, probablemente maghemita. La señal magnética registrada en los suelos del centro de la provincia de Buenos Aires corresponde al denominado patrón de incremento magnético, semejante al de los suelos del sur dicha provincia, pero inverso al de la mayoría de los suelos del norte. Las diferencias se relacionan con el tiempo de permanencia del agua en el suelo, aspecto vinculado al clima, al relieve y a las características hidráulicas del material.

## EXTENDED ABSTRACT

*Magnetic signal in soils of the centre of Buenos Aires province, Argentina*

A great variety of iron oxides are present in soils and paleosols; these can be inherited from the parent material or formed during pedogenesis. Different authors have analyzed magnetic properties of soils and they are mainly associated with climate, topography, soil drainage, characteristics of the parent material or the occurrence of fires. Besides, considering that current climatic and environmental characteristics are more accurately known than such conditions in the geological past, it is estimated that the application of these techniques in soils could help to establish the framework for the study of paleosols through its magnetic properties.

This contribution is part of a wider research, which tends to differentiate the soils of the Pampean region based on their magnetic properties. Four soil profiles from central Buenos Aires province are analyzed from the environmental magnetism perspective (Fig. 1) and are compared with the results obtained by several authors in the north and south of the same province. The comparison tends to develop a regional magnetic model for the Late Pleistocene-Holocene loess deposits and loess-derived soils in the Pampean region

The soils of the study area are developed from loess deposits of Late Pleistocene-Holocene (Las Ánimas Formation), but they are also controlled by the presence of a regional calcareous crust found below of Las Ánimas Formation, affecting loessoid fluvial sediments that constitute another lithostratigraphic unit, called Vela Formation (Middle Pleistocene). The current climate is humid to subhumid, mesothermal, with a slight hydric excess, with an average annual rainfall of 838 mm and annual average temperature of 13,6°C; potential evapotranspiration was calculated at 712 mm/year and real evapotranspiration at 694 mm/year.

The soils in the area correspond to the Mollisol order, and as the moisture regime is mainly udic across the region, the suborder is Udoll (Soil Survey Staff, 2014). Taking into account the surveys carried out by Pazos (2014) and INTA (National Institute of Agricultural Technology) in support of the field descriptions (Table 1 - 4), the analysed soils profiles were tentatively classified at the subgroup level of

Soil Taxonomy. Two Typic Argiudolls (P1 and P4), a Petrocalcic Hapludoll (P2) and a Typic Hapludoll (P3) were recognized. Whereas the Typic Argiudolls correspond to “zonal” soils, the rest are “intrazonal” soils, in which the development of the Petrocalcic Hapludoll is conditioned by a shallow duricrust and the Typic Hapludoll by a relatively high slope.

Samples of each soil horizon were extracted for analysis by thermogravimetric techniques, which allowed loss on ignition determination at 550 and 1000°C, and the measurement of magnetic parameters, which included magnetic susceptibility, isothermal remanent magnetization and anhysteretic remanent magnetization. Figure 3 shows the variation of the determined parameters as depth-functions for each soil profile, whereas the analyses related to the lithostratigraphic units and soil horizons are shown in the histograms of figures 4 to 6. Besides, the greater amounts of measurements of magnetic susceptibility ( $\chi_{bf}$ ) make it possible a more detailed analysis of this parameter (Fig. 5b).

The coercivity of remanence ( $H_{cr}$ ) and S-ratio (Coef. S) values, as well acquisition of isothermal remanent magnetization curves design (Fig. 7), are consistent with the magnetic signature of ferrimagnetic species. According to Peters and Dekkers' graph (2001), the samples correspond to magnetite-titanomagnetites-maghemite (Fig. 8a). These data are consistent with those indicated for other soils with loessic parent materials of the Pampean region where it has been determined by different ways that the detrital magnetic composition mainly corresponds to titanomagnetites with low titanium. According to King *et al.* (1982) (Fig. 9) the magnetic grains would be less than 1 micron diameter, and are considered of single domain (SD). Samples of horizons A and B present smaller magnetic particles than the parent materials (C horizons). Besides, the frequency-dependent susceptibility indicates that the relative presence of ultrafine particles (SP) increase in the solum horizons, in which there is also recorded, taking into account the inter-parametric relations, an increase of fine magnetic particles (SD and SD-SP limit) (Fig. 10). Finally, the decline of  $H_{cr}$  values at the A and B horizons would indicate that the magnetic particles of pedogenetic origin formed in these horizons have low coercivity (Fig. 8b).

An aspect to remark is that the magnetic concentration in the parent material of the analyzed soils presents differences between the soils of north

and south of the same province (Fig. 11). It is lower in the north and higher in the south; this would be related to the sediment distribution mechanisms at the regional level and the sources areas, corroborating the utility of magnetic parameters for provenance analyses. In our case, it seems that the deposits register the highest magnetic concentrations as closer to the source area, in the flood plains of the Colorado and Negro Rivers, but in the north of Buenos Aires is also possible a contribution of poorly magnetic sediments of a cratonic origin related to the Paraná River basin.

In respect to the pedogenetic magnetic signal, the behavior corresponds to the so-called magnetic enhancement, linked to an enrichment of ultrafine (SP) to fine (SD) magnetic particles by the effect of pedogenesis. The same behavior was determined in soils in the south of the province of Buenos Aires; while in the north of this province the opposite (depletion) dominates. Such difference seems to be related to the time of permanence of the water in the soil, an aspect that integrates climate, topography and hydraulic characteristics of the material. It is considered that a prolonged permanence of water in the soil favors the loss of lithogenic magnetite by oxidation. On the other hand, the alternation of wetting-drying cycles of short duration in a predominance of aerobic conditions, leads to the neof ormation of magnetite (and/or maghemite) particles, as well as a greater conservation of the detrital magnetite.

**Keywords:** Soils, Environmental Magnetism, Quaternary, Loess, Tandilia.

## INTRODUCCIÓN

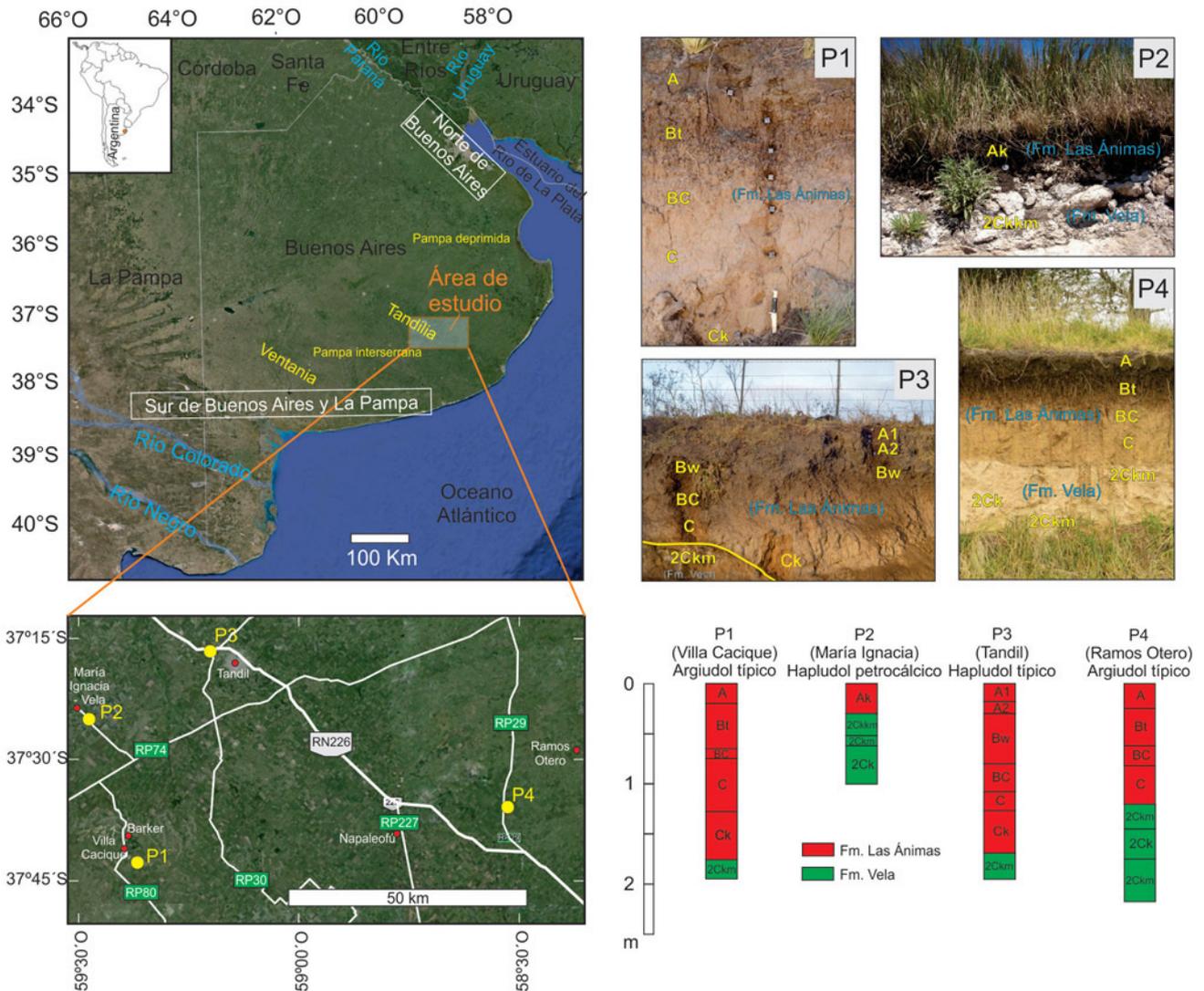
Las técnicas del magnetismo ambiental son utilizadas para investigar la génesis, transporte, depositación y alteración de los minerales, especialmente óxidos de hierro, presentes en rocas o sedimentos (Evans y Heller, 2003; Liu *et al.*, 2012). Los parámetros magnéticos proporcionan valiosa información acerca del tipo, abundancia y tamaño de grano de los minerales magnéticos, los cuales están íntimamente relacionados con los procesos ambientales. Gran variedad de óxidos de hierro se presentan en suelos y paleosuelos; éstos pueden ser heredados del material parental o formados durante la pedogénesis. Distintos autores han analizado las propiedades magnéticas de suelos y las relacionaron

entre otras cosas con el clima, la topografía, las condiciones de drenaje, las características del material parental o la ocurrencia de incendios (Maher 1986, 1998; Hanesch y Petersen 1999; Nabel *et al.*, 1999; Dearing *et al.*, 2001; Orgeira *et al.*, 2008; Jordanova *et al.*, 2010; Bartel *et al.*, 2011). En este sentido, dado que las características climáticas y ambientales actuales se conocen con mayor exactitud que las del pasado geológico, el estudio de suelos constituye un marco de referencia para el estudio de paleosuelos y su interpretación paleoclimática y paleoambiental. Además, cabe resaltar que la utilización de parámetros magnéticos, dada la elevada sensibilidad de éstos a diversas propiedades edáficas, es cada vez más frecuente como herramienta complementaria para la clasificación y cartografía de suelos (Bautista *et al.*, 2014).

Este trabajo es parte de un estudio más amplio, que propende a la diferenciación de los suelos de la región pampeana sobre la base de sus propiedades magnéticas. Se analizan desde la óptica del magnetismo ambiental cuatro perfiles de suelo que se desarrollan en el centro de la provincia de Buenos Aires, en los partidos de Benito Juárez, Tandil y Balcarce (Fig. 1). El objetivo es caracterizar la señal magnética de los mismos e interpretarla en función de los factores de formación de los suelos. Además, los resultados obtenidos son comparados con los de otras áreas ubicadas al norte y sur de la misma con la finalidad de contribuir a la elaboración de un modelo magnético para los suelos de la región pampeana, teniendo en cuenta aspectos climáticos y sedimentarios, especialmente relacionados con las áreas de aporte y la redistribución del loess a nivel regional.

## Características generales del área de estudio

Los suelos estudiados se desarrollan en el sector pedemontano de Tandilia, donde el ciclo pedogénico actual afecta principalmente los depósitos de loess del Pleistoceno tardío-Holoceno de la Formación Las Ánimas (Gómez Samus, 2016; Gómez Samus *et al.*, 2016, 2017). Esta unidad se apoya generalmente sobre la Formación Vela (Rabassa, 1973) del Pleistoceno medio, que corresponde a materiales loésicos redepositados por acción fluvial, con elevado contenido de carbonatos, los cuales conforman una duricostra calcárea de extensión regional (Rabassa, 1973; Teruggi, 1973; Pazos, 2014). La composición de la fracción arena de las unidades



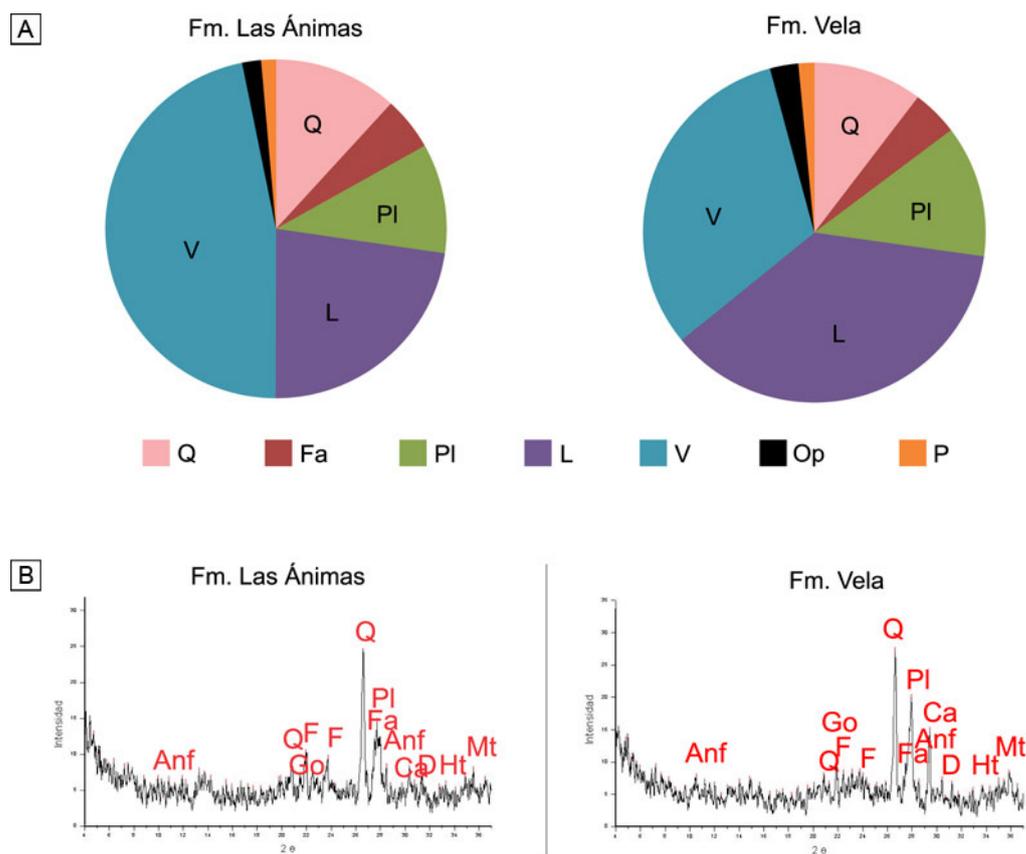
**Figura 1.** Ubicación del área de estudio y perfiles de suelo muestreados.  
**Figure 1.** Location of the study area and sampled soil profiles.

mencionadas corresponde principalmente a vidrio volcánico ácido y litoclastos, principalmente de volcanitas (Fig. 2a). En la figura 2b se incluyen difractogramas (roca total) representativos de dichas unidades, donde los “picos” máximos corresponden a cuarzo, plagioclasas, feldespatos alcalinos y calcita; este último es importante en la Formación Vela. En cuanto a los óxidos de hierro, se distingue la presencia de magnetita; los “picos” correspondientes a hematita y goethita son cercanos al ruido de medición (Fig. 2b).

El clima de la región es húmedo a subhúmedo, mesotermal, con un ligero exceso hídrico. La temperatura media anual para Tandil es de 13,6°C (1946-

1986), con una media máxima para el mes de enero de 20,8°C y una media mínima para julio de 8°C (Ruiz de Galarreta, 2006). En el balance hídrico expuesto por Ruiz de Galarreta *et al.* (2007) se indica que la precipitación media anual para Tandil es de 838 mm (1900-2000). El mayor volumen de precipitaciones se registró para los meses de verano (diciembre-enero-febrero) (243 mm) y el menor para los meses de invierno (junio-julio-agosto) (134 mm). La evapotranspiración potencial se estableció en 712 mm/año y la real en 694 mm/año. De mayo a noviembre prevalece el exceso hídrico (144 mm), empero en época estival se registra un ligero déficit de 18 mm.

Teniendo en cuenta los relevamientos llevados



**Figura 2.** Composición mineralógica del material parental (Formaciones Las Ánimas y Vela). a) Composición de la fracción arena (Tomada de Rabassa, 1973); b) Difractogramas de rayos X (Tomados de Gómez Samus, 2016). Donde Q=Cuarzo; Fa=Feldespatos alcalinos; Pl=Plagioclasas; L=Litoclastos; V=Vidrio volcánico; Op=Opacos; P=Pesados; Anf=Anfiboles; Ca=Calcita; Go=Goethita; Ht=Hematita; Mt=Magnetita; D=Diópsido.

**Figure 2.** Mineralogical composition of parent material (Las Animas and Vela Formations). a) Composition of sand fraction (After Rabassa, 1973); b) X-ray diffractograms (After Gómez Samus, 2016). Q=Quartz; Fa=Alkaline Feldspar; Pl=Plagioclase; L=Lithoclasts; V=Volcanic ash; Op=Opaque minerals; P=Heavy minerals; Anf=Amphibole; Ca=Calcite; Go=Goethite; Ht=Hematite; Mt=Magnetite; D=Diopside.

a cabo por INTA (1970, 1989), los suelos del piedemonte de Tandilia corresponden, en líneas generales, al orden Molisol y dado que el régimen de humedad es predominantemente údico en toda la región, el suborden de los mismos corresponde a Udol (ver Soil Survey Staff, 2014). Dentro de éstos, predominan los subgrupos Argiudol Típico y Hapludol Petrocálcico (Pazos, 2014); la presencia de uno u otro depende de la profundidad de la costra calcárea, la cual suele aflorar en las partes altas de las ondulaciones del terreno.

## MATERIALES Y METODOS

La descripción de campo de los cuatro perfiles

se efectuó siguiendo las recomendaciones de Schoeneberger (2000) y consistió en el reconocimiento de los distintos horizontes pedogenéticos y la determinación de profundidades, color en seco y en húmedo (sistema Munsell), textura al tacto, estructura pedogenética, límites y otros caracteres de relevancia (Tablas 1-4). Esto se utilizó para clasificar los suelos en forma tentativa, teniendo en cuenta estudios previos (Pazos, 2014), hasta el nivel de subgrupo (Soil Survey Staff, 2014).

De cada perfil de suelo se extrajeron entre una y tres muestras representativas por horizonte, dependiendo de su espesor y homogeneidad. Las muestras, de aproximadamente medio kilogramo, fueron secadas al aire, molidas y cuarteadas en laboratorio y se

PERFIL 1		
<b>Clasificación:</b>	<i>Argiudol típico</i>	
<b>Posición topográfica:</b>	Piedemonte. Ladera distal de loma amplia	
<b>Pendiente:</b>	2%	
<b>Clase de drenaje natural:</b>	Bien drenado	
UNIDAD LITO-ESTRATIGRÁFICA	HORIZONTE PEDOGENÉTICO	DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA
<b>Fm. Las Ánimas</b>	<b>A</b>	0-20 cm; 10 YR 3/2 en seco, 10 YR 2/1 en húmedo; franco arcillo limoso, presenta fragmentos rocosos de hasta 2 cm de diámetro (menos del 1%); granular fina a media; ligeramente duro; friable; no plástico; ligeramente adhesivo; raíces comunes; límite inferior abrupto y ondulado.
	<b>Bt</b>	20-65 cm; 7,5 YR 4/3 en seco; 7,5 YR 3/2 en húmedo; arcilloso; prismas medios a gruesos, fuertes, que rompen a bloques subangulares medios y finos, fuertes; duro; firme, muy plástico; muy adhesivo; revestimientos arcillo-húmicos muy abundantes; revestimientos de arcillas comunes; raíces escasas; límite inferior gradual y ondulado.
	<b>BC</b>	65-75 cm; 7,5 YR 5/4 en seco; 7,5 YR 3/4 en húmedo; franco arcilloso; bloques subangulares gruesos moderados; ligeramente duro; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; revestimientos de arcilla escasos; límite inferior gradual y ondulado.
	<b>C</b>	75-128 cm; 7,5 YR 5,5/4 en seco; 7,5 YR 3/4 en húmedo; franco; masivo; ligeramente duro; friable; límite inferior gradual y ondulado.
	<b>Ck</b>	128-176 cm; 10 YR 7/3 en seco; 10 YR 4/4 en húmedo; franco; masivo; carbonatos dispersos en la masa y nódulos escasos; límite inferior muy abrupto y plano.
<b>Fm. Vela</b>	<b>2Ckm</b>	176-195+ cm; 10 YR 7/3 en seco, 10 YR 3/4 en húmedo; franco arenoso; bloques subangulares; costra calcárea en planchas gruesas.

**Tabla 1.** Descripción morfológica del perfil 1 (P1) de la localidad de Villa Cacique.

**Table 1.** Morphological description of profile 1 (P1) of the locality of Villa Cacique.

PERFIL 2		
<b>Clasificación:</b>	<i>Hapludol petrocálcico</i>	
<b>Posición topográfica:</b>	Piedemonte distal. Divisoria secundaria. Loma amplia (probable relictos de erosión)	
<b>Pendiente:</b>	1-2%	
<b>Clase de drenaje natural:</b>	Bien Drenado a Algo Excesivamente Drenado	
UNIDAD LITO-ESTRATIGRÁFICA	HORIZONTE PEDOGENÉTICO	DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA
<b>Fm. Las Ánimas</b>	<b>Ak</b>	0-30 cm; 10 YR 2/1 en seco, 10 YR 1/1 en húmedo; franco limoso, presenta fragmentos rocosos de hasta 2 cm de diámetro (menos del 2%); migajosa, fina, débil; ligeramente duro; friable; no plástico; no adhesivo; raíces abundantes; nódulos de carbonato finos comunes; límite inferior abrupto y plano.
<b>Fm. Vela</b>	<b>2Ckkm</b>	30-52 cm; 7,5 YR 8/2 en seco, 7,5 YR 6/3 en húmedo; franco limoso; costra calcárea en láminas muy gruesas, muy dura.
	<b>2Ckm</b>	52-72 cm; 7,5 YR 7/4 en seco, 7,5 YR 5/4 en húmedo; franco arenoso; bloques subangulares a laminar; costra calcárea en planchas muy gruesas, dura.
	<b>2Ck</b>	72-100+ cm; 7,5 YR 6/4 en seco y 7,5 YR 4/4 en húmedo; franco limoso; bloques subangulares; carbonato pulverulento muy abundante.

**Tabla 2.** Descripción morfológica del perfil 2 (P2) de la localidad de María Ignacia-Vela.

**Table 2.** Morphological description of profile 2 (P2) of the locality of María Ignacia-Vela.

PERFIL 3		
<b>Clasificación:</b>	<i>Hapludol típico</i>	
<b>Posición topográfica:</b>	Piedemonte distal. Divisoria secundaria. Ladera de loma estrecha (relicto de erosión)	
<b>Pendiente:</b>	10%	
<b>Clase de drenaje natural:</b>	Algo Excesivamente Drenado a Excesivamente Drenado	
UNIDAD LITO-ESTRATIGRÁFICA	HORIZONTE PEDOGENÉTICO	DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA
<b>Fm. Las Ánimas</b>	<b>A1</b>	0-18 cm; 10 YR 3/2 en seco, 10 YR 2/2 en húmedo; franco; granular, fina, débil; blando; friable; no plástico; no adhesivo; raíces abundantes; crotovinas; límite inferior claro y plano.
	<b>A2</b>	18-30 cm; 10 YR 3/1,5 en seco, 10 YR 2/2 en húmedo; franco; granular, fina, débil; blando; friable; no plástico; no adhesivo; raíces moderadas; crotovinas; límite inferior claro y plano.
	<b>Bw</b>	30-80 cm; 10 YR 3/2,5 en seco; 7,5 YR 2/1,5 en húmedo; franco limoso; bloques subangulares medios, fuertes; duros; firmes, ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; revestimientos arcillo-húmicos escasos; raíces escasas; límite inferior gradual y ondulado.
	<b>BC</b>	80-108 cm; 7,5 YR 5/4 en seco; 7,5 YR 3/4 en húmedo; franco limoso; bloques subangulares gruesos, débiles; no plástico; no adhesivo; límite inferior gradual y ondulado.
	<b>C</b>	108-127 cm; 7,5 YR 6/4 en seco; 7,5 YR 3/4 en húmedo; franco; masivo; ligeramente duro; friable; límite inferior gradual y ondulado.
	<b>Ck</b>	127-169 cm; 7,5 YR 6/4 en seco; 7,5 YR 4/4 en húmedo; franco; masivo; carbonatos dispersos en la masa; límite inferior abrupto e irregular.
<b>Fm. Vela</b>	<b>2Ckm</b>	169-195+ cm. 7,5 YR 6/3 en seco, 7,5 YR 4/3 en húmedo; franco arenoso; bloques subangulares; costra calcárea en planchas gruesas; muy duro.

**Tabla 3.** Descripción morfológica del perfil 3 (P3) de la localidad de Tandil.

**Table 3.** Morphological description of profile 3 (P3) of the locality of Tandil.

destinaron a la medición de parámetros magnéticos y análisis químicos. Para la obtención de un registro de susceptibilidad magnética detallado se extrajeron además muestras a equidistancias verticales de entre 5 y 10 cm, que se colocaron en cilindros plásticos de 10 cm<sup>3</sup>.

Mediante técnicas termogravimétricas se realizaron análisis químicos. Primero, una porción de aproximadamente 20 g de muestra fue secada a estufa a 105°C durante 24 h a los fines de eliminar el agua higroscópica. Luego se trataron a 550°C en mufla durante 3 h para eliminar la materia orgánica y el agua estructural de los minerales hidratados (Ball, 1964; Hoogsteen *et al.*, 2015). Este valor, expresado en forma porcentual, se denomina pérdida por ignición a 550°C (PI550). Posteriormente, las muestras fueron incineradas a 1000°C durante 2 h. Por diferencia de masa entre la lectura a 1000 y 550°C se determinó el valor que denominamos PI1000, que también se

expresó de forma porcentual.

Los parámetros magnéticos se determinaron en el Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN-CONICET-UNCPBA-CIC). La susceptibilidad magnética se obtuvo a temperatura ambiente y en todas las muestras recolectadas. Se utilizó un susceptibilímetro MS2 *Bartington* con sensor MS2B en baja ( $\chi_{bf}$ , 470 Hz) y alta frecuencia ( $\chi_{af}$ , 4700 Hz) y se calculó el factor susceptibilidad dependiente de la frecuencia [ $\chi_{df}\%$  = 100 × ( $\chi_{bf} - \chi_{af}$ )/ $\chi_{bf}$ ]. Aproximadamente 10 g de muestra molida y seca al aire fue colocado en cajas plásticas de 8 cm<sup>3</sup> y se le agregó adhesivo vinílico no magnético para fijar los granos durante la manipulación y la medición. Luego fue determinada la magnetización remanente anhistérica (MRA) mediante un equipo pMRA acoplado a un desmagnetizador por campos alternos Molspin Ltd y un magnetómetro rotativo Minispin de la misma

PERFIL 4		
<b>Clasificación:</b>	<i>Argiudol típico</i>	
<b>Posición topográfica:</b>	Divisoria secundaria. Loma amplia	
<b>Pendiente:</b>	1%	
<b>Clase de drenaje natural:</b>	Bien drenado	
UNIDAD LITO-ESTRATIGRÁFICA	HORIZONTE PEDOGENÉTICO	DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA
<b>Fm. Las Ánimas</b>	<b>A</b>	0-25 cm; 10 YR 3/2 en seco, 10 YR 1,5/2 en húmedo; franco arcillo limoso; granular, fina; duro; no plástico; no adhesivo; raíces abundantes; límite inferior abrupto y plano.
	<b>Bt</b>	25-62 cm; 7,5 YR 5/4 en seco; 7,5 YR 2/3 en húmedo; arcilloso; prismas medios a gruesos, fuertes que rompe a bloques subangulares medios y finos, fuertes; duro; firme, plástico; adhesivo; barnices arcillo-húmicos abundantes; barnices de arcilla comunes; raíces escasa; límite inferior claro y ondulado.
	<b>BC</b>	62-82 cm; 7,5 YR 5/4 en seco; 7,5 YR 3/4 en húmedo; franco arcilloso; bloques subangulares gruesos débiles; ligeramente duro; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; barnices de arcilla escasos; límite inferior gradual y ondulado.
	<b>C</b>	82-120 cm; 7,5 YR 5,5/4 en seco; 7,5 YR 3/4 en húmedo; franco limoso; masivo; friable; límite inferior; límite inferior abrupto y ondulado.
<b>Fm. Vela</b>	<b>2Ckm</b>	120-145 cm; 10 YR 7/4 en seco; 10 YR 5/4 en húmedo; franco limoso; bloques subangulares; costra calcárea en planchas gruesas; muy duro; límite inferior claro y ondulado.
	<b>2Ck</b>	145-175 cm; 10 YR 5/4 en seco; 10 YR 3/4 en húmedo; franco limoso; bloques subangulares; carbonato de calcio en la masa, muy abundante; límite inferior claro y ondulado.
	<b>2Ckm</b>	175-217+ cm; 10 YR 6/4 en seco; 10 YR 5/4 en húmedo; franco limoso; bloques subangulares; costra calcárea en planchas medias; duro.

**Tabla 4.** Descripción morfológica del perfil 4 (P4) de la localidad de Ramos Otero.

**Table 4.** Morphological description of profile 4 (P4) of the locality of Ramos Otero.

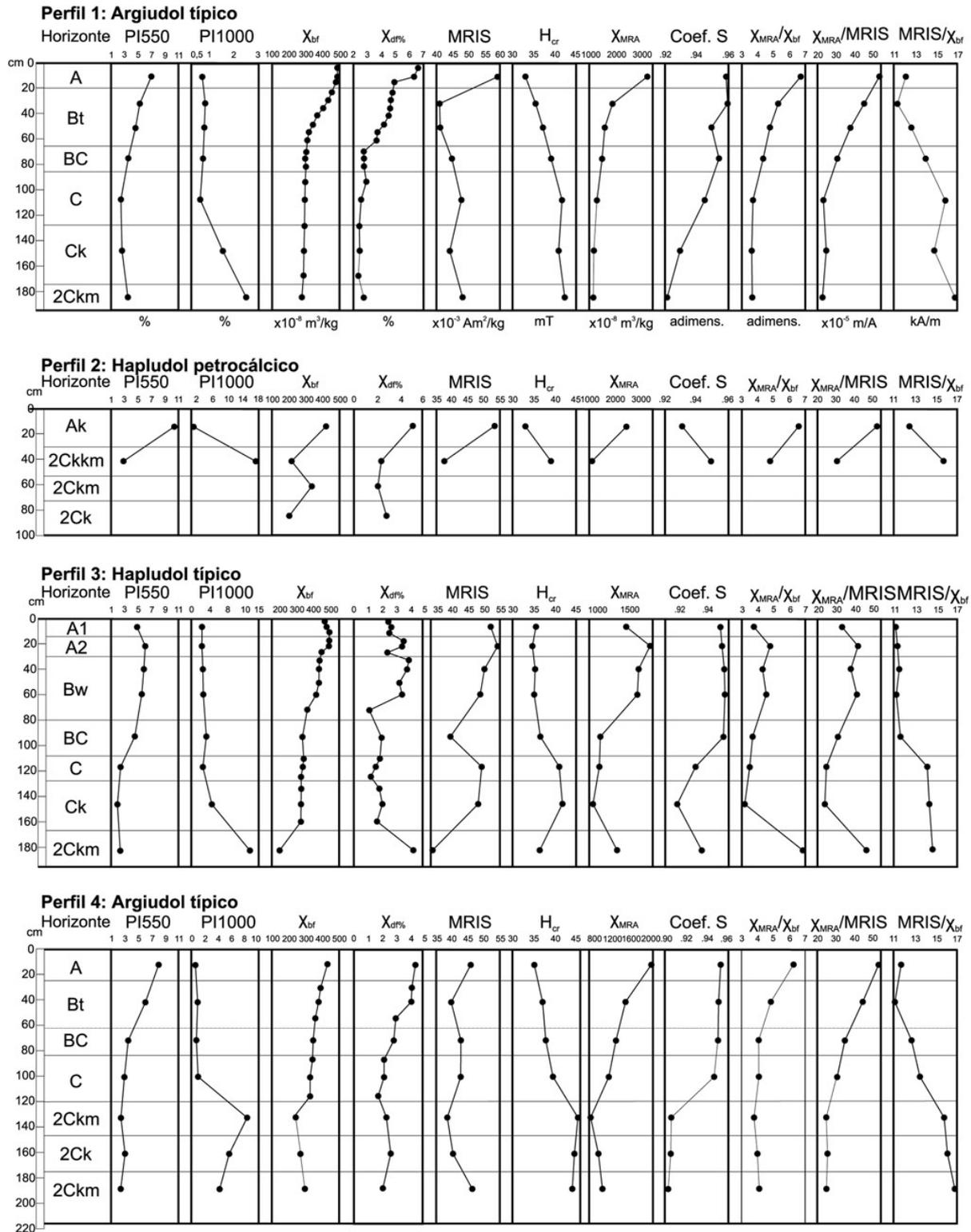
marca. El campo alterno fue fijado en 100 militeslas (mT), con una tasa de decrecimiento de 17  $\mu$ T por ciclo. La MRA se determinó a campos directos continuos de 50  $\mu$ T (39,79 A/m) y 90  $\mu$ T (71,62 A/m); con estos datos se calculó la susceptibilidad anhística ( $\chi_{MRA}$ ) que corresponde a la pendiente de la recta definida entre ambos valores. Luego, previa desmagnetización por campos alternos hasta 100 mT, se obtuvo la magnetización remanente isotermal (MRI). Para ello se utilizó el magnetómetro descripto anteriormente y un magnetizador de pulso AC Scientific modelo IM-10-30. El campo máximo aplicado fue 1 Tesla (T); el valor obtenido se considera la magnetización remanente isotermal de saturación (MRIS). Luego, mediante campo inverso se obtuvieron los valores de coercitividad de la remanencia ( $H_{cr}$ ) y el coeficiente S (Coef. S) ( $MRI_{0,3T}/MRIS$ ). Los parámetros extensivos se expresan normalizados por la masa. Además se efectuaron

relaciones interparamétricas ( $\chi_{MRA}/\chi_{bf}$ ,  $\chi_{MRA}/MRIS$  y  $MRIS/\chi_{bf}$ ).

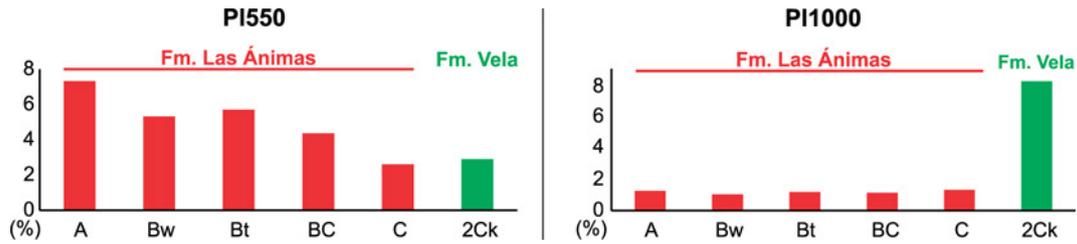
Los parámetros determinados se indican como función profundidad de los perfiles de suelo (Fig. 3). Además se construyeron histogramas con los valores promedio para los distintos horizontes de suelo (Figs. 4-6). La mayor cantidad de mediciones de  $\chi_{bf}$  (n=85) hace posible un análisis más detallado de este parámetro (Fig. 5b). Las curvas de adquisición del MRI y campo inverso se indican en la figura 7.

## RESULTADOS

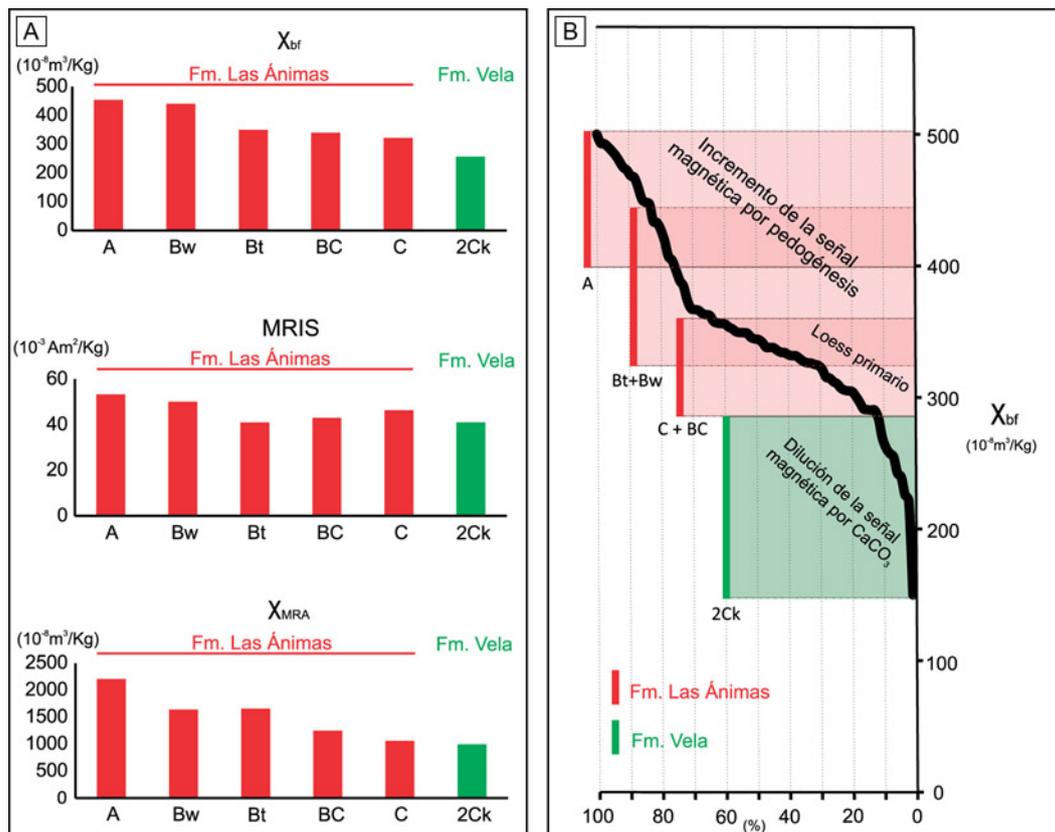
Se reconocieron dos Argiudoles típicos (P1 y P4), un Hapludol petrocálcico (P2) y un Hapludol típico (P3). Los Argiudoles típicos corresponden a suelos “zonales”, es decir, su desarrollo responde predominantemente al clima. En cambio, los perfiles 2 y 3 evidencian un marcado grado de “intrazo-



**Figura 3.** Variación en profundidad de los parámetros determinados. PI550: Pérdida por calcinación a 550°C; PI1000: Pérdida por calcinación a 1000°C - PI550;  $\chi_{bf}$ : Susceptibilidad magnética en baja frecuencia (470 Hz);  $\chi_{df\%}$ : Susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia; MRIS: Magnetización remanente isotermal de saturación;  $H_{cr}$ : Coercitividad de la remanencia;  $\chi_{MRA}$ : Susceptibilidad magnética anhistérica; Coef. S: Coeficiente S y relaciones interparamétricas ( $\chi_{MRA}/\chi_{bf}$ ;  $\chi_{MRA}/MRIS$ ;  $MRIS/\chi_{bf}$ ).  
**Figure 3.** Variation of determined parameters in function of depth. PI550: Loss on ignition at 550°C; PI1000: Loss on ignition at 1000°C-PI550;  $\chi_{bf}$ : Magnetic susceptibility at low frequency (470 Hz);  $\chi_{df\%}$ : Frequency dependent of magnetic susceptibility; MRIS: Saturation of isothermal remanent magnetization;  $H_{cr}$ : Coercivity of remanence;  $\chi_{MRA}$ : Anhyseric magnetic susceptibility; Coef. S: S-ratio and interparametric relations ( $\chi_{MRA}/\chi_{bf}$ ;  $\chi_{MRA}/MRIS$ ;  $MRIS/\chi_{bf}$ ).



**Figura 4.** Valores promedio para los horizontes de suelo de pérdida por calcinación (PI550 y PI1000).  
**Figure 4.** Mean values for soil horizons of loss on ignition (PI550 and PI1000).

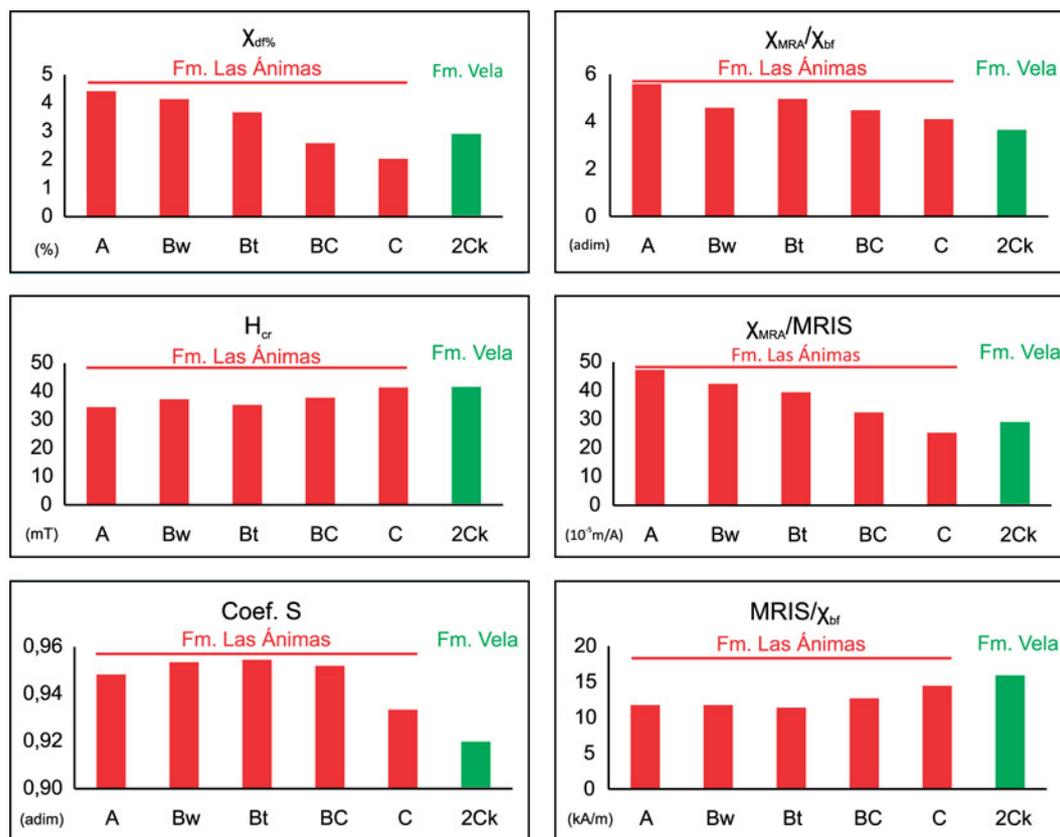


**Figura 5.** Parámetros magnéticos extensivos. a) Histogramas indicando valores promedio para los horizontes de suelo ( $\chi_{bf}$ : Susceptibilidad magnética en baja frecuencia (470 Hz); MRIS: Magnetización remanente isotermal de saturación;  $\chi_{MRA}$ : Susceptibilidad magnética anhística). b) Curva acumulada de  $\chi_{bf}$  donde también se indican los horizontes de suelo.  
**Figure 5.** Extensive magnetic parameters. a) Histograms indicating average values for soil horizons ( $\chi_{bf}$ : Magnetic susceptibility at low frequency (470 Hz); MRIS: Saturation of isothermal remanent magnetization;  $\chi_{MRA}$ : Anhysteretic magnetic susceptibility). b) Cumulative frequency curve of  $\chi_{bf}$  soil horizons are also indicated.

nalidad” donde el Hapludol petrocálcico está condicionado por la escasa profundidad de la costra calcárea (Fm. Vela), y el Hapludol típico por un menor ingreso de agua al perfil de suelo, vinculado a una pendiente más elevada.

Los valores de la mayoría de los parámetros determinados presentan una clara diferenciación por

pedogénesis (Fig. 3). Los valores más elevados de PI550 corresponden a los horizontes con mayor contenido de materia orgánica (A) y los más bajos a los horizontes C (Fig. 4). En cambio, los valores de PI1000 parecen no estar controlados por el desarrollo del suelo sino por diferencias en el material parental, que se corresponde con la mayor cantidad de carbo-



**Figura 6.** Valores promedio de los parámetros magnéticos intensivos y relaciones interparamétricas para los horizontes de suelo. Izquierda: Parámetros intensivos ( $\chi_{df\%}$ : Susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia;  $H_{cr}$ : Coercitividad de la remanencia; Coef. S: Coeficiente S). Derecha: Relaciones interparamétricas ( $\chi_{MRA}/\chi_{bf}$ ;  $\chi_{MRA}/MRIS$ ;  $MRIS/\chi_{bf}$ ).  
**Figure 6.** Mean values of intensive magnetic parameters and interparametric relations for soil horizons. Left: Intensive magnetic parameters ( $\chi_{df\%}$ : Frequency-dependent of magnetic susceptibility;  $H_{cr}$ : Coercivity of remanence; Coef. S: S-ratio). Right: Interparametric relations ( $\chi_{MRA}/\chi_{bf}$ ;  $\chi_{MRA}/MRIS$ ;  $MRIS/\chi_{bf}$ ).

nato de calcio (calcita) en la Formación Vela (Fig. 2b).

Los parámetros magnéticos extensivos, como  $\chi_{bf}$ ,  $\chi_{MRA}$  y MRIS, que dependen de la concentración, pero además del tipo de mineral magnético y de su tamaño de grano, evidencian incrementos en los horizontes del *solum* (A, Bw, Bt y BC) (Fig. 5). Esto es más evidente para  $\chi_{bf}$  y  $\chi_{MRA}$ . Para el caso de MRIS se registraron valores relativamente bajos en los horizontes Bt, probablemente debido a la dilución de la señal magnética por el incremento de argilominerales por iluviación, y porque este parámetro es menos sensible a la presencia de partículas magnéticas finas que  $\chi_{bf}$  y  $\chi_{MRA}$ . En la curva acumulativa es posible apreciar claramente la tendencia al incremento de los valores de  $\chi_{bf}$  en los horizontes del *solum* (Fig. 5b), con los más elevados en los horizontes A, los intermedios en los horizontes B y los más bajos en los horizontes C, sobre todo en

aquellos que presentan elevado contenido de  $CaCO_3$  (2Ck; Fm. Vela) por dilución de la señal.

Los parámetros intensivos, que no dependen de la concentración, pero sí del tipo y tamaño de grano de los minerales magnéticos, también presentan claras variaciones en función de los horizontes del suelo (Fig. 6). Por ejemplo, la  $\chi_{df\%}$  presentó un patrón similar a los parámetros extensivos, con valores máximos en el *solum* que indicarían, como será tratado más adelante, mayor presencia de nanopartículas superparamagnéticas en esos horizontes. Por su parte, la  $H_{cr}$  registró un descenso de los valores hacia el horizonte A, con los valores más elevados en los horizontes C y 2Ck. El Coef. S registró valores cercanos a 1 en todos los casos, propios de un predominio de minerales ferrimagnéticos, aunque levemente más elevados en los horizontes del *solum*. Finalmente, las relaciones interparamétricas, que eliminan los efectos de la con-

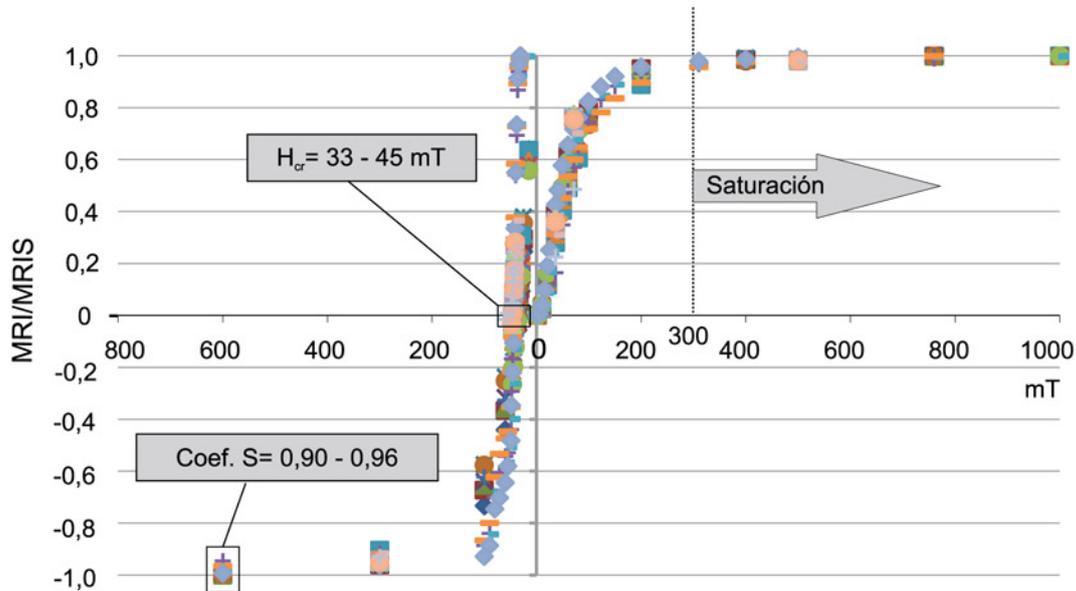


Figura 7. Curvas de adquisición normalizadas del magnetismo remanente isotermal.

Figure 7. Isothermal remnant magnetism acquisition normalized curves.

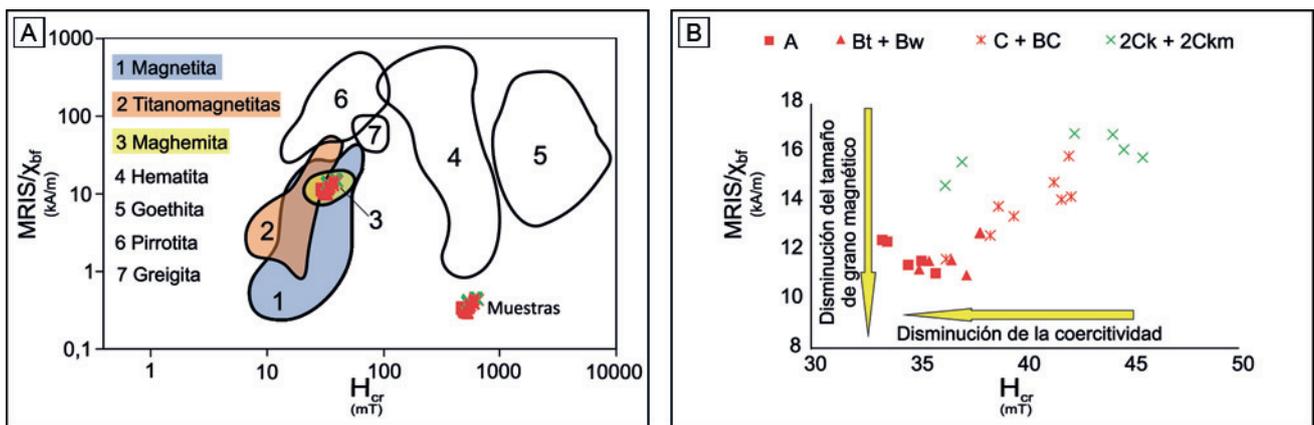


Figura 8. Composición magnética según Peters y Dekkers (2003).

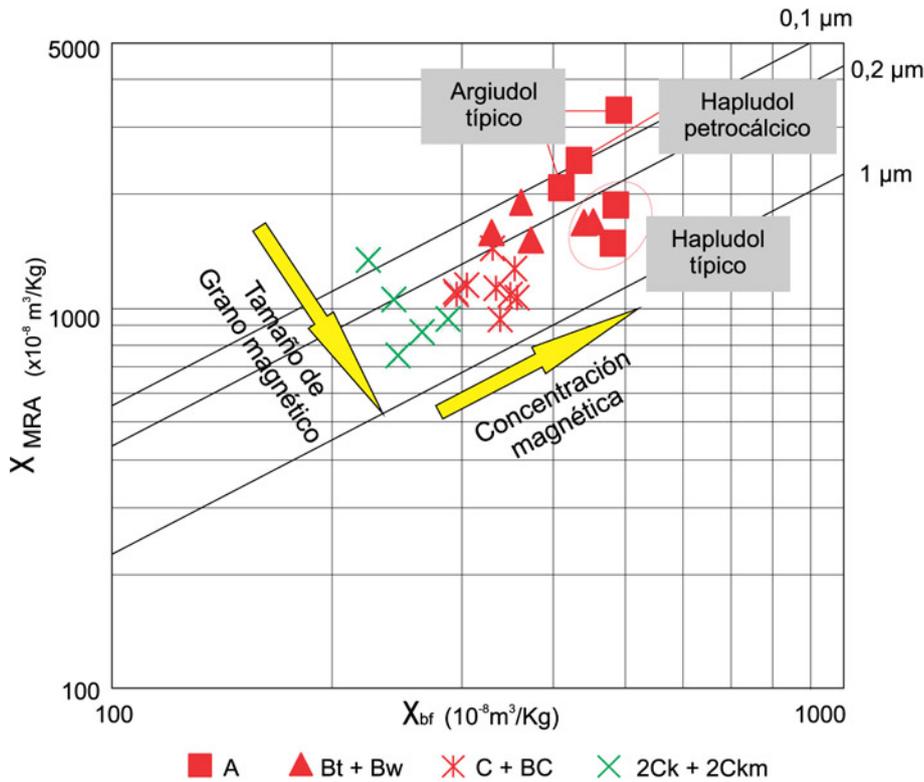
Figure 8. Magnetic composition according Peters and Dekkers (2003).

centración y son importantes indicadores de tamaño de grano magnético (en particular para magnetita), muestran variaciones semejantes al resto de los parámetros (Fig. 6). Por ejemplo, la relación  $\chi_{MRA}/\chi_{bf}$  presenta un coeficiente de correlación muy fuerte y positivo con la  $\chi_{df\%}$  (0,91), es decir, con valores más elevados en el *solum*. Asimismo, la relación  $\chi_{MRA}/MRIS$  presenta un patrón de variación similar a  $\chi_{MRA}/\chi_{bf}$  con un coeficiente de correlación lineal entre ambos parámetros de 0,90. Finalmente, los valores de la relación  $MRIS/\chi_{bf}$  presentaron máximos en los

horizontes 2Ck y C y mínimos en los horizontes del *solum*.

### Mineralogía magnética y tamaño de grano magnético

A juzgar por los valores de  $H_{cr}$ , Coef. S, así como por el diseño de las curvas de adquisición, la señal magnética de las muestras analizadas corresponde a especies ferrimagnéticas, con saturaciones alcanzadas cerca de los 300 mT (Fig. 7). El gráfico de Peters y Dekkers (2001) (Fig. 8a) es utilizado como indicador



**Figura 9.** Tamaño de grano magnético según King *et al.* (1982)  
**Figure 9.** Magnetic grain size according King *et al.* (1982)

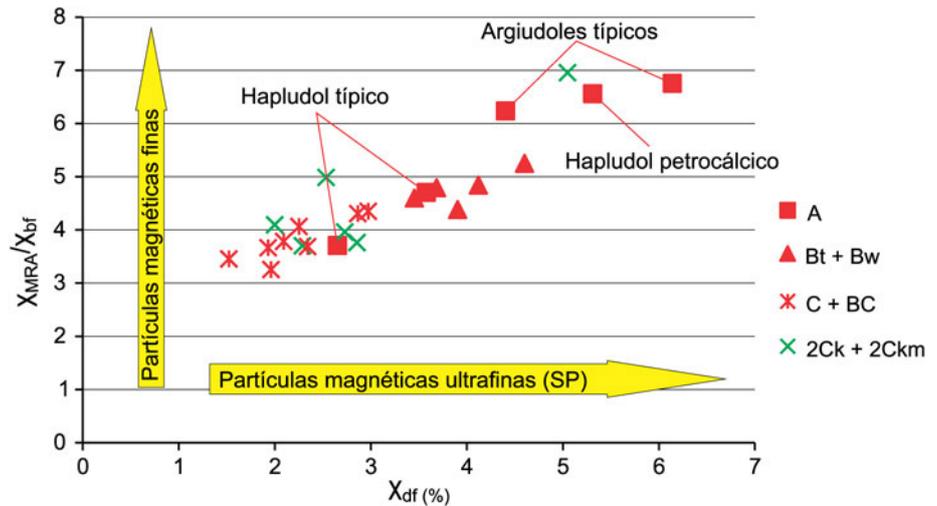
de la composición magnética. Según éste, las muestras corresponden a magnetita-titanomagnetitas-maghemita. Esto es consistente con los análisis mediante DRX expuestos en Gómez Samus (2016) (Fig. 2b), que indican la presencia de magnetita, o bien isomorfos de ésta como las titanomagnetitas o la maghemita. No se descarta la presencia de minerales antiferromagnéticos, como hematita o goethita, aunque se encontrarían en proporciones tales que sus señales magnéticas estarían enmascaradas por la de las especies ferrimagnéticas.

En relación al tamaño de grano magnético, según el diagrama de King *et al.* (1981) (Fig. 9), los granos magnéticos presentan diámetros inferiores a 1 μm. Según este esquema, las partículas más pequeñas corresponden a los horizontes A, especialmente de los Argiudoles típicos y del Hapludol petrocálcico, y a los horizontes Bt. Las muestras del *solum* del Hapludol típico presentan un enriquecimiento moderado en partículas finas y ultrafinas. Los diámetros mayores se registran en los horizontes C. Este patrón es consistente con la variación de los parámetros  $\chi_{df\%}$ ,  $\chi_{MRA}/\chi_{bf}$ ,  $\chi_{MRA}/MRIS$  y  $MRIS/\chi_{bf}$  (Fig. 3) que son utilizados también como indicadores

de las variaciones de tamaño de grano magnético. El primero de éstos ( $\chi_{df\%}$ ) se relaciona con la presencia de partículas SP (ultrafinas) (Dearing, 1996); en cambio, el resto se asocia principalmente a magnetita fina (SD y del límite SP-SD) (Evans y Heller, 2003; Blanchet *et al.*, 2007; entre otros). Si bien los valores de  $\chi_{df\%}$  se incrementan en los horizontes del *solum*, éstos son inferiores a 7%; lo que indica que la relación entre partículas SP y no-SP es baja. Sin embargo, la elevada concentración de especies ferrimagnéticas en el material parental puede ocultar parcialmente la señal de las partículas superparamagnéticas formadas por pedogénesis (ver detalles en Gómez Samus, 2016).

Existe una tendencia al incremento de partículas finas y ultrafinas vinculada a la pedogénesis, especialmente en los horizontes A de los Argiudoles típicos y del Hapludol petrocálcico, secundariamente en los horizontes B (Fig. 10). Los horizontes A del Hapludol típico presentarían una contribución relativa más escasa de partículas finas y ultrafinas que los horizontes A del resto de los perfiles; esto probablemente ligado a que la pendiente más elevada del terreno limitaría el ingreso del agua y conse-

**Figura 10.** Distribución de partículas magnéticas finas (DS) y ultrafinas (SP).  
**Figure 10.** Distribution of fine (SD) and ultrafine (SP) magnetic particles.



cuentemente el desarrollo pedogenético.

La clara disminución de los valores de  $H_{cr}$  en función de la pedogénesis, a la vez que los coeficientes de correlación (R) fuertes a muy fuertes de este parámetro con los indicadores de tamaño de grano (-0,71 con  $\chi_{df}\%$ ; -0,67 con  $\chi_{MRA}/\chi_{bf}$ ; -0,86 con  $\chi_{MRA}/MRIS$  y 0,81 con  $MRIS/\chi_{bf}$ ) (Fig. 8b), podría corresponder a la formación pedogenética de partículas de baja coercitividad y tamaño de grano fino a muy fino, como por ejemplo maghemita. Esta situación ha sido advertida por distintos autores (Avramov, 2006; Bartel et al., 2011).

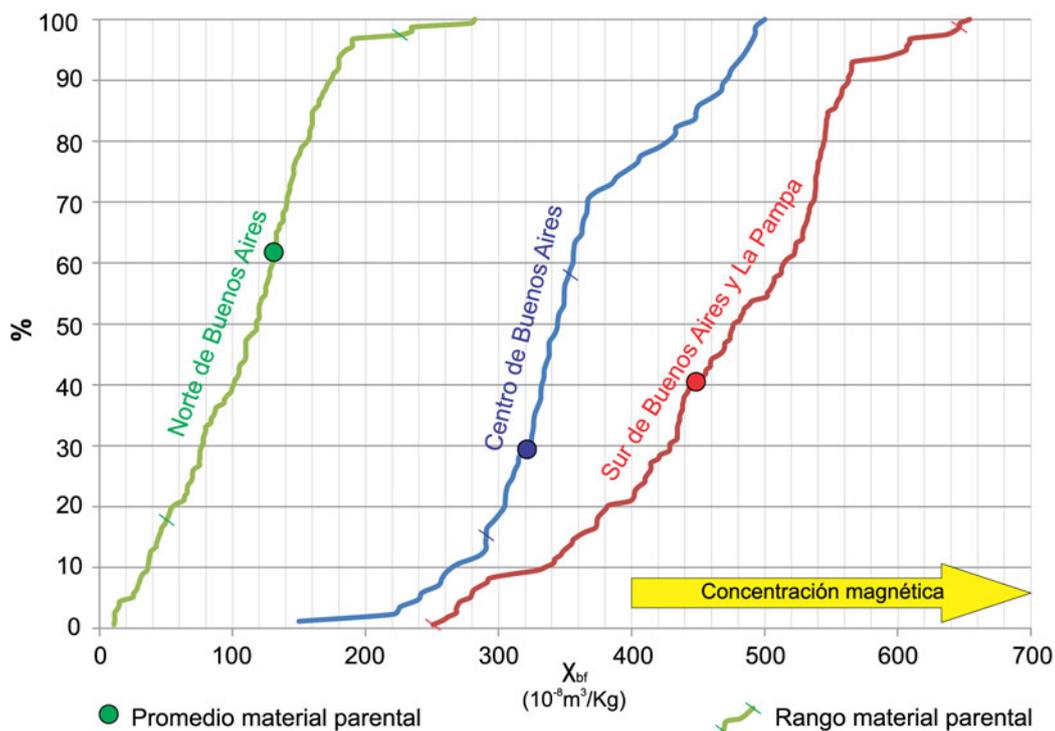
## DISCUSIÓN

### Señal magnética detrítica y aporte sedimentario

Los minerales que dominan la señal magnética, correspondientes a especies del tipo magnetita-titanomagnetitas-maghemita en el material parental, son consistentes con los minerales magnéticos indicados para el loess de otros sectores de la llanura pampeana (Bartel et al., 2005; Vasquez et al., 2008; Orgeira et al., 2008, 2009; Bartel, 2009; Liu et al., 2010; Bartel et al., 2011; Rouzaut et al., 2012, 2014). En algunos de estos trabajos se ha determinado por diferentes vías (tales como susceptibilidad magnética en baja temperatura y SEM-EDAX) que la composición magnética detrítica corresponde principalmente a titanomagnetitas, aunque con bajo contenido de titanio.

Como fue señalado por otros autores (Bidegain et

al., 2005, 2007, 2009), el loess de la región pampeana (basándose principalmente en los depósitos del norte de la provincia de Buenos Aires) presenta una concentración magnética significativamente más elevada que los depósitos de loess de China, este de Europa, Estados Unidos y Australia, y puede considerarse junto con los de Siberia y Alaska como un loess fuertemente magnético. Asimismo, la concentración magnética en el material parental de los suelos del centro de la provincia de Buenos Aires presenta diferencias con los materiales parentales del norte y sur de la misma provincia. En la figura 11 se compara la curva acumulativa de susceptibilidad magnética de los suelos del presente trabajo, con las curvas acumulativas del mismo parámetro para suelos desarrollados a partir de depósitos de loess de edad semejante (Pleistoceno tardío - Holoceno) en el sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa (Bartel, 2009; Bartel et al., 2011) y en el norte de la provincia de Buenos Aires (Bartel et al., 2005; Orgeira et al., 2008, 2009; Vasquez et al., 2008; Liu et al., 2010). Es evidente que los valores registrados en el material parental de los suelos del centro de la provincia de Buenos Aires son más bajos que en el sur y más elevados que en el norte. Zárata y Blasi (1991, 1993) indicaron que las partículas que componen el manto eólico del Pleistoceno tardío - Holoceno en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (sector que incluye al área de estudio), provienen principalmente de las planicies aluviales de los ríos Colorado y Negro y proceden de rocas originadas en los Andes patagónicos, luego redepositadas por



**Figure 11.** Comparación de curvas de susceptibilidad magnética acumulada para el norte, centro y sur de la provincia de Buenos Aires. En las mismas se indica el valor promedio para el material parental y los valores máximos y mínimos.

**Figure 11.** Comparison of magnetic susceptibility cumulative frequency curves to the north, center and south of Buenos Aires province. They show average values for the parent material and the maximum and minimum values.

procesos eólicos y fluviales. De esta manera, los depósitos de loess del sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa, más proximales al área de aporte, recibirían mayor cantidad de titanomagnetitas. Esto es consistente con lo observado por Etchichurry y Tófaló (2004), quienes indicaron que los minerales pesados (principalmente magnetita) en la fracción arena y limo grueso del material parental de los suelos pampeanos están en mayores concentraciones hacia el sur de Buenos Aires y La Pampa (superando el 30%) y disminuyen hacia el noreste (con valores inferiores al 5%). En consistencia con lo expuesto, los depósitos de loess del Pleistoceno tardío – Holoceno en el norte de la provincia de Buenos Aires presentan los valores de susceptibilidad más bajos. Esto se relacionaría principalmente a la posición distal respecto de las áreas de aporte, ya sean del sudoeste (cuencas de los ríos Colorado y Negro) como del oeste (Cuenca del río Desaguadero y Sierras Pampeanas) y a la participación de minerales de origen cratónico, vinculados a la cuenca del Paraná (Etchichurry y Tófaló, 2004).

### Señal magnética pedogenética

La variación de los parámetros magnéticos en los suelos del centro de la provincia de Buenos Aires es consistente con el patrón de incremento magnético (*enhancement*), dado por generación pedogenética de partículas SP y DS de baja coercitividad en los horizontes A y B. Este comportamiento es análogo al registrado por Bartel (2009) y Bartel *et al.* (2011) en el sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa, con condiciones de mayor sequedad (precipitaciones entre 400 y 800 mm/año) y predominio de déficit hídrico. Sin embargo, es opuesto al registrado en la mayoría de los suelos ubicados hacia el norte de la provincia de Buenos Aires (Bartel *et al.*, 2005; Orgeira *et al.*, 2008, 2009), donde ocurren precipitaciones más abundantes (1000 mm/año) y predomina el exceso hídrico. Este último patrón, es denominado como merma de la susceptibilidad (*depletion*), y se vincula a la destrucción de las magnetitas litogénicas por oxidación.

Orgeira y Compagnucci (2009) y Orgeira *et al.* (2011) plantearon que los patrones magnéticos (incremento vs. merma) estarían ligados a la relación entre la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial. En el centro de la provincia de Buenos Aires, la precipitación media anual es mayor que la evapotranspiración potencial, con potencial de almacenamiento de agua (PWS) de 126 y una razón de humedad (W) de 1,18; valores que según los autores mencionados corresponderían al patrón de merma. Para analizar esta inconsistencia, teniendo en cuenta a Orgeira y Rouzaut (2016), es preciso considerar que el contenido de vidrio volcánico en el material parental de los suelos analizados es elevado (Fig. 2a), siendo el componente predominante en la fracción arena de la Formación Las Ánimas. Esta consideración es de interés, dado que según Orgeira *et al.* (2011) y Orgeira y Rouzaut (2016) fundamentándose en Florindo *et al.* (2003), sugirieron que este componente promueve la merma de la susceptibilidad magnética en los suelos de la región pampeana.

Si bien el clima constituye un forzante de gran importancia, es evidente que todos los factores de formación controlan la respuesta magnética de los suelos. Un aspecto a considerar, que integra al clima, al relieve y a las características hidráulicas del material, y que no ha sido evaluado aún en forma concreta, corresponde al tiempo de permanencia del agua en el suelo. En suelos donde la permanencia del agua es relativamente prolongada, se generarían procesos que conducen a la pérdida de magnetita litogenética mediante oxidación secundaria, como sucede en los suelos hidromórficos (Bartel *et al.*, 2005; Bidegain *et al.*, 2005, 2007). En cambio, en suelos con ciclos de humedecimiento y secado, de corta duración y predominio de condiciones aeróbicas, se produciría la neoformación de partículas de magnetita (y/o maghemita), así como una mayor conservación de la magnetita litogenética, como es el caso de los suelos del área de estudio y los del sur de la provincia de Buenos Aires (Bartel *et al.*, 2011).

## CONCLUSIONES

Los suelos analizados del centro de la provincia de Buenos Aires presentan una señal magnética afín a especies ferrimagnéticas del tipo magnetita-titanomagnetitas-maghemita. Según las técnicas utilizadas, el diámetro de los granos magnéticos es inferior

a 1  $\mu\text{m}$ , principalmente Dominio Simple (DS).

La señal magnética del material parental (horizontes C) se incrementa hacia el sur de la provincia de Buenos Aires. Esto está en estrecha relación con la procedencia de los sedimentos, con mayor cantidad de titanomagnetitas hacia el área fuente (suroeste).

El registro de susceptibilidad magnética, con valores más elevados en los horizontes A y B, es consistente con el patrón de incremento. Esto se vincula a un enriquecimiento en partículas magnéticas (magnetita/maghemita) de tamaños de grano ultrafino (SP), del límite SP-DS y fino (DS), por pedogénesis.

La señal magnética pedogenética es análoga a la registrada en el sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa, con condiciones de mayor sequedad y predominio de déficit hídrico, pero opuesta a la registrada en la mayoría de los suelos ubicados hacia el norte de la provincia de Buenos Aires con precipitaciones más abundantes y predominio de exceso hídrico. Esta diferencia se vincula al tiempo de permanencia del agua en el suelo, aspecto que integra al clima, al relieve y a las características hidráulicas del material. Se considera que una prolongada permanencia de agua en el suelo favorece la pérdida de magnetita litogenética mediante oxidación. En cambio, ciclos de humedecimiento y secado, de corta duración y predominio de condiciones aeróbicas, conducen a la neoformación de partículas de magnetita (y/o maghemita), así como mayor conservación de la magnetita detrítica.

## Agradecimientos

Al LEMIT, a la CIC, al CONICET por las facilidades brindadas. Al Instituto de Física Arroyo Seco (Tandil) por permitir el uso de su equipamiento e instalaciones. A los árbitros Francisco Bautista y Ana Sinito por sus comentarios y sugerencias; al Profesor Ing. Jorge E. Giménez por el análisis crítico y detallado del manuscrito y a los editores de LAJSBA por sus comentarios de detalle.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avramov, V., D. Jordanova, V. Hoffman y W. Roesler, 2006. The role of dust source area and pedogenesis in three loess-paleosol sections from north Bulgaria: a mineral magnetic study. *Studia Geophysica et Geodaetica* 50:259-282.
- Ball, D.F., 1964. Loss-on-Ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *Journal of Soil*

Science 15:84-92.

- Bautista, F., R. Cejudo-Ruiz, B. Aguilar-Reyes y A. Gogichaishvili**, 2014. El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66:365-376.
- Bartel, A.A.**, 2009. *Caracterización magnética de una climosecuencia de suelos entre el sureste de la provincia de La Pampa y el litoral atlántico*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, 325 pp. (inédito).
- Bartel, A., J.C. Bidegain y A.M. Sinito**, 2005. Propiedades magnéticas de diferentes suelos del partido de La Plata, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60:591-598.
- Bartel, A., J.C. Bidegain y A.M. Sinito**, 2011. Magnetic parameter analysis of a climosequence of soils in the Southern Pampean Region, Argentina. *Geofísica Internacional* 50:9-22.
- Bidegain, J.C. y Y. Rico**, 2004. Mineralogía magnética y registros de susceptibilidad en sedimentos cuaternarios de polaridad normal (Brunhes) y reversa (Matuyama) de la cantera de Juárez, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59:451-461.
- Bidegain, J.C., L. Terminiello, Y. Rico, R.C. Mercader y E. Aragon**, 2004. Mineralogía magnética en la transición Brunhes/Matuyama. Pleistoceno de la provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59:193-199.
- Bidegain, J.C., M.E. Evans y A.J. van Velzen**, 2005. A magnetoclimatological investigation of Pampean Loess. *Geophysics Journal International* 160:55-62.
- Bidegain, J.C., A.J. van Velzen y Y. Rico**, 2007. The Brunhes/Matuyama boundary and magnetic parameters related to climatic changes in Quaternary sediments of Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 23:17-29.
- Bidegain, J.C., Y. Rico, A. Bartel, M.A.E. Chaparro y S.S. Jurado**, 2009. Magnetic parameters reflecting pedogenesis in Pleistocene loess deposits of Argentina. *Quaternary International* 209:175-186.
- Blanchet, C., N. Thouveny, L. Vidal, G. Leduc, K. Tachikawa, E. Bard y L. Beaufort**, 2007. Terrigenous input response to glacial/interglacial climatic variations over southern Baja California: a rock magnetic approach. *Quaternary Science Review* 26:3118-3133.
- Cornell R.M. y U. Schwertmann**, 2003. *The Iron Oxides*, 2nd edn. Wiley-VCH, Weinheim, 664 pp.
- Dearing, J.A., R.J.L. Dann, K. Hay, J.A. Lees, P.J. Loveland y K. O'Grady**, 1996. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophysical Journal International* 124:228-240.
- Dearing, J.A., J. Hannam, A. Anderson y E. Wellington**, 2001. Magnetic, geochemical and DNA properties of highly magnetic soils in England. *Geophysical Journal International* 144:183-196.
- Evans, M.E. y F. Heller**, 2003. *Environmental Magnetism*. Academic Press, Oxford, 312 pp.
- Etchichury, M. y R. Tófaló**, 2004. Mineralogía de arenas y limos en suelos, sedimentos fluviales y eólicos actuales del sector austral de la cuenca Chacoparanense. Regionalización y áreas de aporte. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59:317-329.
- Florindo F., A.P. Roberts y M.R. Palmer**, 2003. Magnetite dissolution in siliceous sediments. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 4:13 p.
- Gómez Samus, M.L.**, 2016. *Magnetoestratigrafía y parámetros magnéticos en sedimentos del Cenozoico tardío del sector Tandil-Balcarce-Mar del Plata*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, 430 pp. (inédito)
- Gómez Samus, M.L., Y. Rico y J.C. Bidegain**, 2016. Magnetoestratigrafía en sucesiones del Cenozoico tardío del área de Sierras de Balcarce, Tandilia. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73:588-607.
- Gómez Samus, M.L., Y. Rico y J.C. Bidegain**, 2017. Magnetostratigraphy and magnetic parameters in Quaternary sequences of Balcarce, Argentina. A contribution to understand the magnetic behaviour in Cenozoic sediments of South America. *GeoResJ* 13:66-82.
- Hanesch, M. y N. Petersen**, 1999. Magnetic properties of a recent parabrown-earth from Southern Germany. *Earth and Planetary Science Letters* 169:85-97.
- Hoogsteen, M.J.J., E.A. Lantinga, E.J. Bakker, J.C. Groot y P.A. Tittonell**, 2015. Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss. *European Journal of Soil Science* 66:320-328.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)**, 1970. *Carta de Suelos de la República Argentina*, Hojas 3760-23, 3760-29 y 3760-30. Buenos Aires.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)**, 1989. *Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires*. Instituto de Suelos. INTA. Buenos Aires. 525 pp.
- Jordanova D., N. Jordanova, P. Petrov y T. Tsacheva**, 2010. Soil development of three Chernozem-like profiles from North Bulgaria revealed by magnetic studies. *Catena* 83:158-169.
- Liu, Q.S., J. Torrent, H. Morrás, A. Hong, Z.X. Jiang y Y.L. Su**, 2010. Superparamagnetism of two modern soils from the northeastern Pampean region, Argentina and its paleoclimatic indications. *Geophysical Journal International* 183:695-705.
- Liu, Q.S., A.P. Roberts, J.C. Larraso, S.K. Banerjee, Y. Guyodo, L. Tauxe y F. Oldfield**, 2012. Environmental magnetism: Principles and applications. *Reviews of Geophysics* 50:RG4002 AGU.
- Maher, B.A.**, 1986. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Physics Earth Planetary International* 42:76-92.
- Maher, B.A.**, 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paeleoecology* 137:25-54.
- Nabel, P., H. Morrás, N. Petersen, y W. Zech**, 1999. Correlation of magnetic and lithologic features from soils and Quaternary sediments from the undulating Pampa, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 12:311-323
- Orgeira, M.J. y R.H. Compagnucci**, 2006. Correlation between paleosol-soil magnetic signal and climate. Earth, Planets and Space (EPS), *Special Issue "Paleomagnetism and Tectonics in Latin America"* 58:1373-1380.
- Orgeira, M.J. y R.H. Compagnucci**, 2010. Uso de la señal magnética de suelos y paleosuelos como función climática. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65:612-623.
- Orgeira, M.J. y S. Rouzaut**, 2016. Evaluación cualitativa de la influencia del contenido volcánico del loess pampeano (Argentina) en diferentes paleosuelos desarrollados durante los MIS 5. *Latinmag Letters* 6 (Special Issue):D16, 1-4.
- Orgeira, M.J., F.X. Pereyra, C. Vásquez, E. Castañeda y R. Compagnucci**, 2008. Environmental magnetism in present soils, Buenos Aires province, Argentina. *Journal of South American Earth Science* 26:217-224.
- Orgeira, M.J., C. Vásquez, R. Compagnucci, I. Raposo y F. Pereyra**, 2009. Magnetismo de rocas en suelos actuales de la Pampa

- Ondulada provincia de Buenos Aires, Argentina. Vinculación del clima en el comportamiento magnético. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26:65-78.
- Orgeira, M.J., R. Egli y R. Compagnucci**, 2011. A quantitative model of magnetic enhancement in loessic soils. En E Petrovsky, D Ives, T Harinarayana y E Herrero-Bervera (Eds.), *The Earth Magnetic Interior*. IAGA special Sopron book series, Springer 25:361-368.
- Pazos, M.S.**, 2014. Acumulaciones de carbonato de calcio en suelos del centro-SE bonaerense. En P. Imbellone (Ed.), *Suelos con acumulaciones calcáreas y yesíferas de Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Peters, C. y M.J. 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.
- Rabassa, J.**, 1973. Geología Superficial en la hoja "Sierras de Tandil", provincia de Buenos Aires. *Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas* 2:115-160.
- Rouzaut, S., M.J. Orgeira, C. Vásquez, G. Argüello y J. Sanabria**, 2012. Magnetic properties in a loess-paleosol sequence of Corralito, Córdoba, Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 25:57-65.
- Rouzaut, S., M.J. Orgeira, C. Vásquez, R. Ayala, G.L. Argüello, A. Tauber, R. Tófaló, I. Mansilla y J. Sanabria**, 2015. Rock magnetism in two loess-paleosol sequences in Córdoba, Argentina. *Environmental Earth Science* 73:6323-6339.
- Ruiz de Galarreta, A.**, 2006. *Geohidrología y balance hidrológico de la zona no saturada en la cuenca superior del arroyo Tandileofú, Provincia de Buenos Aires*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata, 181 pp. (inédito).
- Ruiz de Galarreta, A., M. Varni, R. Banda Noriega y R. Barranquero**, 2007. Caracterización geohidrológica preliminar en la cuenca del Arroyo Langueyú, Partido de Tandil, Buenos Aires. *V Congreso Argentino de Hidrogeología* Actas:119-128, Paraná.
- Sala, J.M.**, 1975. Recursos Hídricos. En V. Angelelli (Ed.), *Relatorio de Geología Provincia de Buenos Aires*. VI Congreso Geológico Argentino:178-193.
- Schoeneberger, P.J., D.A. Wysocky, E.C. Benham y W.D. Broderson**, 2000. Libro de campaña para descripción y muestreo de suelos. Versión 1.1. Instituto de Suelos, Centro de Recursos Naturales, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina. Traducción en español del "Field Book for Describing and Sampling Soils", 1998. *Centro Nacional de Relevamiento de Suelos, Servicio de Conservación de Recursos Naturales*, Dto. de Agricultura EE.UU., Lincoln, Nebraska 9 (10) p.
- Soil Survey Staff**, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th Edition. USDA, Washington DC. 362 pp.
- Teruggi, M.E., L.A. Spalletti y L.H. Dalla Salda**, 1973. Paleosuelos en la Sierra Bachicha, Partido de Balcarce. *Revista del Museo de La Plata, Sección Geología* 8:227-256.
- Vasquez, C.A., M.J. Orgeira y A.M. Sinito**, 2008. Origin of superparamagnetic particles in Argiudolls developed on loess, Buenos Aires (Argentina). *Environmental Geology* 56:1653-1661.
- Zárate, M.A. y A. Blasi**, 1991. Late Pleistocene and Holocene loess deposits of southeastern Buenos Aires province. Argentina. *Geojournal* 24:211-220.
- Zárate, M.A. y A. Blasi**, 1993. Late Pleistocene-Holocene eolian deposits of southern Buenos Aires Province. Argentina: a preliminary model. *Quaternary International* 17:15-30.