

## ESTUDIO COMPARATIVO DE PROPIEDADES MAGNÉTICAS EN LA REGIÓN CENTRAL DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, ARGENTINA

### COMPARATIVE STUDY OF MAGNETIC PROPERTIES IN CENTRAL REGION OF CÓRDOBA PROVINCE, ARGENTINA

Rouzaut, S.<sup>1,4</sup>, Orgeira, M.J.<sup>2</sup>, Tófaló, O.R.<sup>3</sup>, Vásquez, C.<sup>2</sup>, Argüello, G.L.<sup>4</sup>, Sanabria, J.<sup>4</sup>, Mansilla, L.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Becaria CONICET

<sup>2</sup>Dpto. Ciencias Geológicas. FCEN, UBA, IGEBA. Ciudad Universitaria - Pab. II, Bs. As.

<sup>3</sup>Dpto. Ciencias Geológicas. FCEN, UBA, IDEAN. Ciudad Universitaria - Pab. II, Bs. As.

<sup>4</sup>Cátedra de Pedología. Escuela de Geología. F.C.E.F.y N. UNC.

<sup>5</sup>Cátedra de Geomorfología. Escuela de Geología. F.C.E.F.y N. UNC.

#### RESUMEN

En la presente contribución se presentan resultados obtenidos de dos perfiles ubicados en localidades cercanas en la región central de la provincia de Córdoba. El objetivo del estudio fue determinar los parámetros magnéticos de los sedimentos constitutivos de los perfiles a fin de establecer una correlación entre ambos, así como efectuar una valoración de los cambios paleoambientales registrados. Ambos perfiles fueron descritos y muestreados en detalle; en los especímenes colectados se realizaron mediciones de susceptibilidad magnética a 470 Hz y 4700 Hz, coercitividad, coercitividad de remanencia, magnetización de saturación y magnetización remanente de saturación, S-ratio, magnetización remanente anhística y susceptibilidad a altas temperaturas. Los resultados obtenidos permiten inferir que a pesar de encontrarse en una misma región, existen diferencias en la señal magnética, lo cual puede deberse a mayor presencia de carbonatos en uno de los perfiles, mayor retrabajo del material, diferencias en la permeabilidad, o una combinación de todas esas causas.

**Palabras Clave:** Loess-paleosuelo. Magnetismo de rocas.

#### ABSTRACT

This contribution presents results obtained from two profiles located in nearby towns in the central region of Córdoba province. The objective of the study was to determine the magnetic parameters of the sediments that constitute the profiles in order to establish a correlation between both of them, and to evaluate any record of paleoenvironmental changes.

The profiles were described and sampled in detail; in the collected specimens magnetic susceptibility at 470 Hz and 4700 Hz was measured, as well as coercivity, coercivity of remanence, saturation magnetization and remanent saturation magnetization, S-ratio, anhysteretic remanent magnetization and susceptibility at high temperatures. From the obtained results it is possible to infer that despite the proximity of the profiles, there are differences in their magnetic signal, which may be due to a higher content of carbonates in one of the profiles, more remobilization of the material, permeability differences, or a combination of all these causes.

**Keywords:** Loess-paleosol-Rock Magnetism.

#### INTRODUCCIÓN

Son escasos al presente los estudios sistemáticos de paleosuelos en la llanura pampeana de nuestro país, a pesar de que este tipo de registro geológico brinda importantísima información paleoclimática. El estudio de propiedades magnéticas permite comprender los procesos pedogenéticos y su relación con la alteración y/o génesis de minerales magnéticos y por ende inferir los climas pasados (Orgeira *et al.*, 2009). La premisa fundamental del magnetismo ambiental es relacionar las variaciones en las propiedades de los minerales magnéticos de materiales naturales y vincularlas con los cambios ambientales.

Para explicar la génesis de la señal magnética y sus relaciones con los procesos pedogenéticos existe más de una hipótesis. Por un lado, Maher (1998) plantea un origen orgánico en que los factores temperatura, humedad, compuestos orgánicos y actividad bacteriana (bacterias magnetotácticas) son fundamentales para la conversión de óxidos de hierro y la generación de magnetita ultrafina. Por otro lado, Boyle *et al.* (2010) sugieren que la señal es resultado de un material parental rico en hierro y que se necesitan condiciones de precipitación y temperatura adecuadas para la neoformación de minerales magnéticos. Entre otros, Heller *et al.* (1991) proponen que las propiedades magnéticas están climáticamente controladas por alteración química, en particular, debido a los procesos de decalcificación en los horizontes superiores y reprecipitación del carbonato, lo que genera concentración de óxidos de Fe en los horizontes inferiores.

Los objetivos principales de la presente contribución fueron determinar los parámetros magnéticos no direccionales, con el fin de caracterizar el material edafizado de una misma unidad litológica en diferentes localidades; y determinar los cambios climáticos producidos utilizando el modelo, propuesto por Orgeira *et al.* (2011), que considera las variaciones de tipo inorgánico en la mineralogía durante la pedogénesis. Este modelo se funda en los procesos de óxido-reducción del Fe en sucesivos estadios estacionales (Orgeira y Compagnucci, 2006). El proceso comienza con la meteorización de minerales para y ferromagnéticos en períodos húmedos (mayor retención de agua en los suelos). La actividad biológica oxida la materia orgánica y libera iones de Fe y Mn que forman compuestos orgánicos y se combinan con arcillas. En el horizonte iluvial la magnetita se transforma o disuelve como consecuencia del agua circulante en el perfil, y pasa de Fe<sup>+3</sup> a Fe<sup>+2</sup>, para que esto suceda, debe existir un ambiente ligeramente reductor y pH cercano a 7. En resumen, la formación de magnetita pedogenética está condicionada por un suelo bien drenado, pH entre 5 y 8, y la presencia de materia orgánica. Diversas posibilidades pueden reforzar este proceso:

a) El agua de lluvia se infiltra y arrastra los ligandos orgánicos, los cuales son retenidos en la superficie de las partículas de magnetita formando complejos de esfera interna, debilitando la unión del Fe con el óxido y facilitando así el pasaje al medio acuoso.

b) El agua se infiltra, pero posee oxígeno disuelto el cual es empleado para la degradación de la materia orgánica y formación de ligandos bidentados. Estos ligandos estabilizan el Fe<sup>+2</sup> incrementando su efecto reductor y tornando el ambiente más reductor a lo largo del perfil, hasta la capa freática.

c) Las fluctuaciones de la capa freática (evidenciadas por moteados, etc.) modifican los campos de estabilidad del Fe<sup>+2</sup> y Fe<sup>+3</sup> que se mueven acoplados al movimiento del agua.

Estos procesos llevan a la idea de un umbral pedogenético impulsado por el balance hídrico del suelo, que fue utilizado por Orgeira y Compagnucci (2006, 2010) y Orgeira *et al.* (2011) para explicar el incremento y la disminución de la señal magnética en los suelos loésicos del mundo. Orgeira *et al.* (2011) proponen una relación entre clima y señal magnética, el índice W o relación de humedad:

$$(W = \text{MAR} / \text{Petc});$$

Donde:

W: Relación de humedad

Petc: Potencial de evapotranspiración mensual corregido por latitud y duración del mes.

MAR: Precipitación media anual (siglas en inglés).

W es un parámetro que relaciona el promedio de precipitación anual, en función de R, que es el volumen de lluvia caída por unidad de superficie y tiempo.

Cuando el índice  $W_0 \approx 1$  ( $W_0$ : Poros saturados, cuya agua se evapotranspira), marca la transición de condiciones relativamente secas a condiciones saturación de agua. En cambio,  $W > W_0$  indica el comienzo de un régimen de saturación, disminución en la frecuencia de los ciclos secos / húmedos y suprime la producción de magnetita. Cuando  $0,5 < W_0 < 1$ , indica suelos mal drenados.

Según este parámetro Córdoba posee un W cercano a cero, por lo cual no se espera generación, ni pérdida de partículas magnéticas.

## MARCO GEOLÓGICO ESPECÍFICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las primeras investigaciones sobre Geología del Cuaternario en la provincia de Córdoba las llevó a cabo Ameghino (1885, 1889) quien definió los pisos de la Fm. Pampeana en base a su contenido faunístico.

Döring (1907) sintetizó la Fm. Pampeana en tres capas según el ambiente de depositación y su textura.

Frengüelli (1918) establece la secuencia en base a perforaciones y determina que la Fm. Pampeana está constituida por loess y se formó en un clima frío. No se registran estudios sobre el Cuaternario, hasta que Santa Cruz (1972, 1978) genera un primer esquema para la zona central de Córdoba, estableciendo unidades para el Pleistoceno- Holoceno. A la Fm. Pampeana la denomina Mb. Inf. Fm. Río Primero.

Cantú (1992) basado en los estudios de Fidalgo *et al.* (1973) caracterizó los sedimentos al sur de la provincia y a los depósitos de loess los asignó a la Fm. Pampeana.

Finalmente se ajustaron las edades entre 100 ka en la base y 57 ka en el techo (Frechen, *et al.*, 2009) y 105 ka a 50 ka para base y techo respectivamente (Kemp *et al.*, 2006).

Como ya es sabido, hay una confusión generalizada con respecto a los nombres de las formaciones en la Geología del Cuaternario, por lo tanto y para una mejor comprensión se adoptó un esquema de evolución climática sugerido por Sanabria y Argüello (2003). Esto se realizó con el aporte de datos de cuencas vecinas, y es el que mejor se adapta a las localidades estudiadas, donde los sedimentos examinados corresponden a sedimentos loésicos, loessoides y fluvio-eólicos.

### UBICACIÓN DE LOS PERFILES ESTUDIADOS

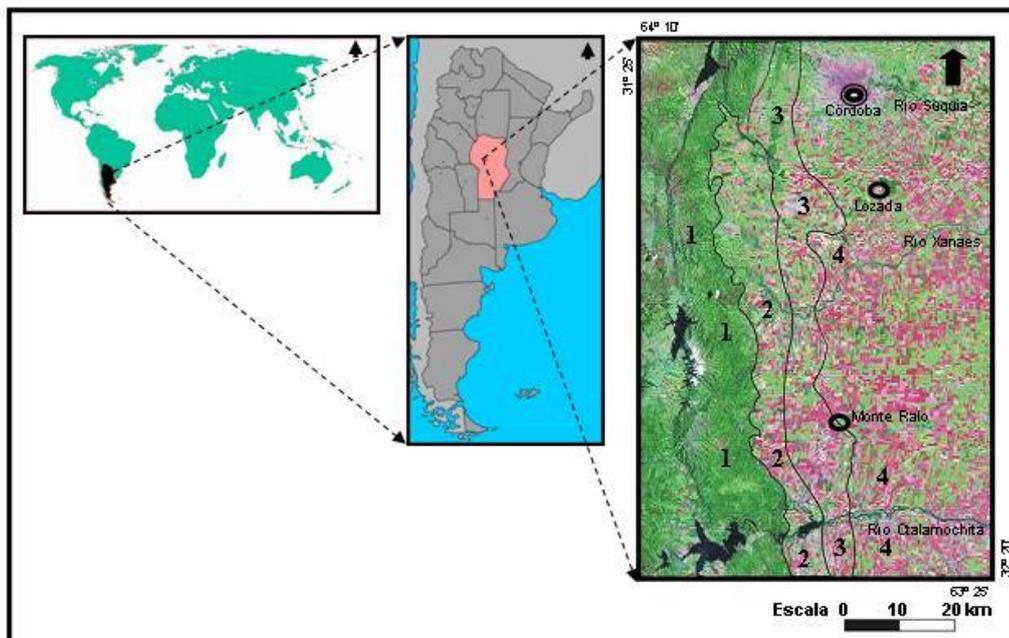
La presente contribución contiene resultados de un estudio de magnetismo ambiental en sedimentos de edad Pleistoceno medio a tardío, en las localidades de Lozada y Monte Ralo, provincia de Córdoba. La primera de las localidades estudiadas es Lozada, ubicada en el Dpto. Santa María (Kemp *et al.*, 2006), cuyo perfil está expuesto a la vera de la ruta provincial N° C-45, 35 km al sur de la capital cordobesa, como resultado de una excavación para desagüe. Las coordenadas del perfil analizado son 31° 39' Lat Sur y 64° 8' Long Oeste, 490 msnm (Figura 1).

La otra localidad estudiada es Monte Ralo, la cual se encuentra en el Dpto. Santa María de la Provincia de Córdoba, a 65 km aproximadamente de la ciudad capital y se accede a ella por la ruta provincial N° 6. El perfil se observa en una cárcava que nace en la cuenca que se denomina Cortada de Grasso. Las coordenadas del perfil estudiado son 31° 54' Lat. Sur y 64° 10' Long. Oeste, 496 msnm (Figura 1).

Ambas localidades se encuentran en la provincia geológica Llanura Chacopampeana, y en la sub-provincia Llanura Pampeana (Sayago, 1981). En ella, se distinguen dos asociaciones la Depresión Periférica y la Plataforma Basculada (Capitanelli, 1979). En esta última, se distinguen dos sub-asociaciones (Sanabria *et al.*, 2006): la Plataforma Basculada Ondulada y la Plataforma Basculada Plana.

El perfil de Monte Ralo se encuentra ubicado en la Subasociación Plataforma Basculada Plana (Sanabria y Argüello, 2003). Esta sub-asociación se caracteriza por colinas suavemente onduladas con pendientes entre 1% y 3%. El material parental está constituido por mantos de loess típico y retransportado con espesores variables (4-12 m), homogéneos, friables con abundante contenido de CaCO<sub>3</sub> en la masa y alto porcentaje de limos gruesos, y de edad aproximada entre 32 ka y 13 ka (Frechen *et al.*, 2009) y 34 ka y 5 ka (Kemp *et al.*, 2006). La erosión hídrica es intensa y se presenta en forma de barrancos o cárcavas.

Por otro lado, el perfil de Lozada, se encuentra ubicado en la Plataforma Basculada Ondulada (Capitanelli, 1979) en la unidad "paleoconos aluviales con cobertura loésica" (Sanabria y Argüello, 1999).



**Figura 1.** Mapa de ubicación y asociaciones geomorfológicas. 1- Sierras de Córdoba. 2-Depresión Periférica. 3- Plataforma Basculada Ondulada. 4-Plataforma Basculada Plana.

**Figure 1.** Location and geomorphological associations map. 1- Córdoba Ranges. 2-Peripheral Depression. 3-Undulated Tilted Platform. 4-Flat Tilted Platform.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los perfiles estudiados pueden considerarse como sucesiones sedimento-pedológicas, de acuerdo con el concepto de Freytenet (1971). Para analizar el perfil de Monte Ralo se han identificado, en primer lugar, las superficies de discontinuidad en la sedimentación, representadas por superficies de erosión. Una vez determinadas, se tuvieron en cuenta: espesor y geometría de los bancos, color, estructuras sedimentarias y edáficas, fósiles, grado de consolidación, análisis granulométricos y composicionales. Para la determinación de colores se utilizó la cartilla de patrones cromáticos del Rock Color Chart Committee.

Los datos granulométricos fueron obtenidos mediante el sedígrafo CILAS del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Buenos Aires. Los carbonatos se determinaron por calcimetría con un calcímetro McLeod en un laboratorio privado.

Para las mediciones de propiedades magnéticas, las muestras se tomaron con una equidistancia de 10 cm aproximadamente. Las mediciones de susceptibilidad magnética se llevaron a cabo con un susceptibilímetro Bartington M2S a dos frecuencias (470 Hz-4700 Hz). Los parámetros de histéresis se midieron con un Magnetómetro Vibrante (VSM) Molspin cuyo campo no supera 1 Tesla, los parámetros medidos son Susceptibilidad magnética másica ( $X_{total}$ ), Magnetización de saturación ( $M_s$ ), Magnetización remanente de saturación ( $M_{rs}$ ), Coercitividad ( $H_c$ ) y Coercitividad de remanencia ( $H_{cr}$ ). Las mediciones de susceptibilidad magnética a altas temperaturas se midieron con un susceptómetro AGICO Kappabridge MFK1-FA cuya frecuencia es de 946 Hz y la amplitud del campo de 200 A/m. Para las mediciones a altas temperaturas las muestras se calentaron hasta 700 °C, luego se dejaron enfriar hasta alcanzar temperatura ambiente, todo el proceso se realizó bajo atmósfera de Ar para evitar la oxidación de los minerales.

Para realizar las mediciones de magnetización remanente isotérmica (MRI) las muestras fueron expuestas a campos de 0,3 T y 1T en un Magnetizador por pulsos ASC Scientific con bobinas que permiten alcanzar hasta un campo de 1,2 T. Luego se midieron en el Dual Speed Spinner Magnetometer AGICO JR-6, con estos datos se obtuvo el valor de la Magnetización Remanente Isotérmica de saturación (MRIS) y pudo calcularse el S-ratio ( $MRI_{0,3T}/MRI_{1T}$ ).

Para llevar a cabo las mediciones de magnetización remanente anhística (MRA) se siguió el protocolo propuesto por Lisé- Pronovost *et al.* (2013). Se sometieron las muestras a campos alternos de 0,1 T y campos continuos de 50  $\mu$ T en el Desmagnetizador rotativo por campos magnéticos alternos LDA-3A (Agico) con magnetizador anhisterético AMU-1<sup>a</sup>, luego estas magnetizaciones se midieron en el Dual Speed Spinner Magnetometer AGICO JR-6. Con los datos obtenidos se calculó la susceptibilidad anhística ( $\chi_{MRA}$ ) normalizando la MRA con el campo continuo aplicado y se calcularon las siguientes relaciones MRA/MRIS, MRA/X y MRIS/X.

## DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES

### Monte Ralo

Se levantó un perfil (Figura 2) de 7,2 m de potencia, en cuya base se observan 35 cm de sedimento de textura franca, anaranjado opaco (7,5YR 6/4), masivo, que correspondería a material loésico edafizado, generando un horizonte 2BCKb<sub>1</sub>, con estructura masiva y abundante carbonato en la masa.

Por encima de una media caña, que marca una paleosuperficie, se observan 50 cm de sedimento limo-arenoso edafizado, de color anaranjado opaco (7,5 YR 6/4), con proyecciones estalactíticas y numerosos poros de 1 a 3 cm de diámetro. Corresponde al horizonte 2Btkb del paleosuelo, presenta bioturbación y barnices de arcillas.

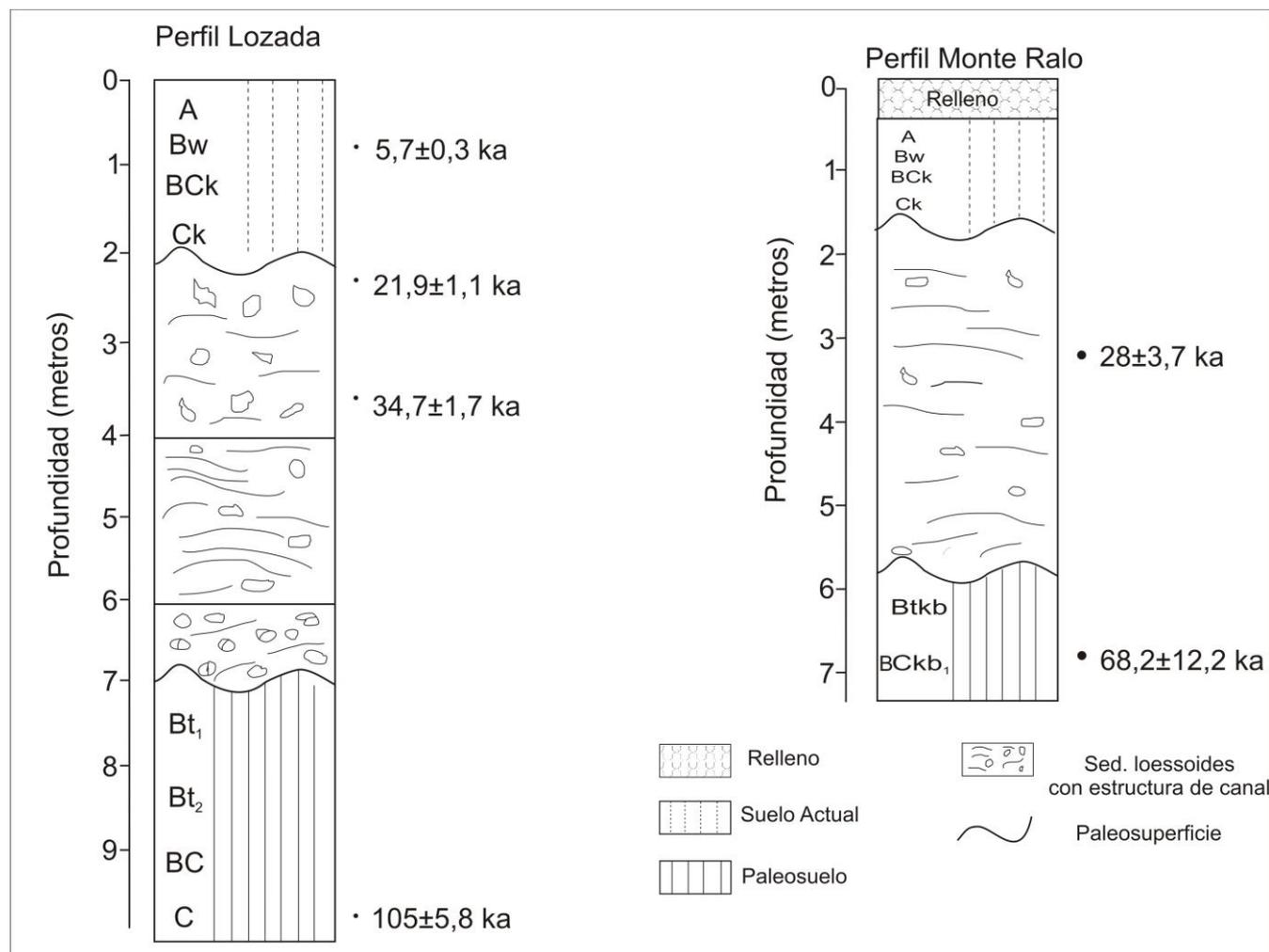
En contacto neto suprayace el resto de los depósitos que integran el perfil- tabulares, masivos, de color gris rojizo claro (10 R 8/2)- y que corresponderían a depósitos de tipo loésico. En el metro superior de estos sedimentos han actuado los procesos pedogénicos, generando un suelo, enterrado en algunos sectores por una cubierta sedimentaria de espesor variable (0,5-0,8 cm) a lo largo del perfil, donde se distinguen los horizontes Ab (10 cm), Bwb (25 cm) y BCb (65 cm). El horizonte Ab es de color marrón (10YR 4/3) y de textura franco-limosa, el horizonte Bwb es de color marrón opaco (7,5 YR 5/3), tiene estructura prismática y en bloques subangulares y presenta incipientes barnices de arcilla, y bioturbación. El horizonte BCb es de color marrón opaco (7,5 YR 5/4), tiene textura franco limosa y en bloques subangulares débiles.

### Lozada

El perfil de Lozada está conformado por un paleosuelo truncado y un suelo actual, ambos separados por 4 m de sedimento (Figura 2).

El paleosuelo está constituido por dos horizontes Bt<sub>1</sub> y Bt<sub>2</sub> de color marrón (7,5 YR 4/4), de textura franco limosa, en los cuales hay evidencias de bioturbación y translocación de arcillas. Por debajo, se encuentra un BC y Ck de color marrón (10 YR 4/4) de textura franco limosa con carbonato en su masa. Por encima del paleosuelo se

encuentran 4 m de sedimento de color marrón amarillento opaco (10 YR 5/4) granulométricamente heterogéneos, con laminación horizontal y subhorizontal con clastos subredondeados asociados a esas estructuras; estos clastos presentan barnices de arcillas lo que permite inferir que habrían procedido de los horizontes Bt. El suelo actual es un Haplustol típico (Sanabria y Argüello. 1999) con perfil A-Bw-BCK-Ck. El horizonte A de color negro amarronado (10YR 3/2) posee una textura franco limosa; el horizonte Bw, de color marrón (10 YR 4/4), posee evidencias de bioturbación e incipientes barnices de arcilla; el horizonte BCK, es de color marrón (10 YR 4/4) y hay abundante carbonato en la masa y el Ck es de color marrón amarillento opaco (10 YR 5/4) (Kemp *et al.*, 2006).



**Figura 2.** Esquemas estratigráficos de las localidades estudiadas. El perfil de Lozada y sus dataciones fue modificado de Kemp *et al.* (2006) y el perfil de Monte Ralo y sus dataciones fue modificado de Frechen *et al.*, (2009).

**Figure 2.** Stratigraphic sketches of the studied locations. Lozada profile and its datings was modified from Kemp *et al.*, (2006), and Monte Ralo profile and its datings was modified from Frechen *et al.* (2009)

## RESULTADOS

### Granulométricos y porcentaje de CaCO<sub>3</sub>

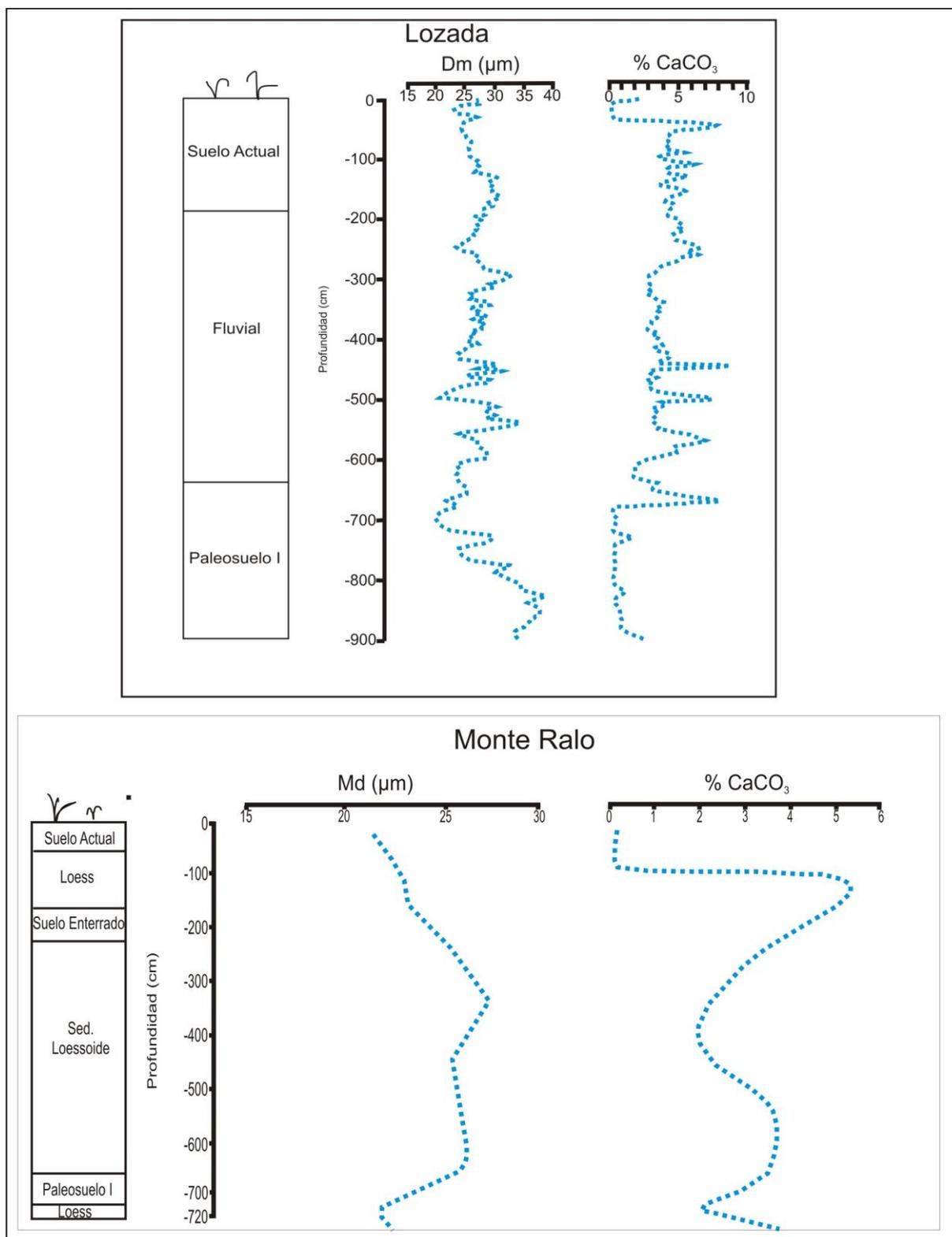
El diámetro medio (D<sub>m</sub>) que se observa en el perfil de Monte Ralo, muestra valores entre 20 y 24 μm (limo medio). En el suelo actual y el suelo enterrado se observan, en los horizontes iluviales, valores ligeramente menores que rondan entre 20 y 23 μm (limo medio); en el manto de loess aumenta a 23 y 27 μm (limo medio), para luego disminuir nuevamente hacia la base del perfil (Figura 3).

El porcentaje de carbonatos del suelo actual es de 0,2% con un aumento pronunciado en el material parental (5%), para luego mantenerse en un rango que fluctúa entre 2 y 4% (Figura 3).

En el perfil de Lozada, la media granulométrica se comporta de manera similar al perfil de Monte Ralo, donde el diámetro medio desciende en los horizontes iluviales de suelo y paleosuelo (20-25 μm), para luego fluctuar a lo

largo del perfil entre 20 y 32  $\mu\text{m}$  (Figura 3). Los diámetros corresponden a limo medio a grueso, lo que indica un origen eólico, para luego fluctuar, lo que evidencia un retrabajo del material (Kemp *et al.*, 2006).

El porcentaje de carbonato de calcio se encuentra en el rango entre 3-5% para el suelo actual y el paleosuelo I (Figura 3) y luego entre -100 cm y -680 cm el porcentaje aumenta levemente (Kemp *et al.*, 2006).



**Figura 3.** Descripción de los perfiles y sus curvas granulométricas medias y de porcentajes de  $\text{CaCO}_3$  correspondientes. Las curvas de Lozada fueron modificadas de Kemp *et al.* (2006).

**Figure 3.** Description of the profiles and their corresponding average granulometric curves and  $\text{CaCO}_3$  percentages. Lozada curves were modified from Kemp *et al.* (2006).

## Resultados Magnéticos

En la Figura 4, los perfiles estratigráficos se han simplificado para facilitar la lectura de las propiedades magnéticas. Debido a que los horizontes pedogenéticos, tales como BC y Ck presentan señales muy similares, el material parental (loess), se los ha unido bajo la denominación loess. Por otro lado, en el perfil de Monte Ralo el relleno que suprayace al suelo enterrado, se omitió ya que no reviste importancia para el presente trabajo; en su lugar se colocaron los datos del suelo actual, para poder establecer la correspondiente comparación con la señal actual.

En el perfil de Lozada se observa una mínima disminución de la  $X_{total}$  en el paleosuelo I respecto al material parental y un ligero aumento de este parámetro en el último metro del perfil correspondiente al suelo actual (Figura 4). Los parámetros extensivos  $M_s$  y  $M_{rs}$  muestran la misma tendencia que la  $X_{total}$ , indicando cambios en la concentración de los minerales magnéticos. Los valores de  $H_c$  se mantienen entre 10-12 mT y los de  $H_{cr}$  varían entre 30-40 mT (Figura 4).

El parámetro S-ratio, se mantiene constante en torno al valor 0,96; ello indica la presencia de minerales de baja coercitividad a lo largo de todo el perfil, aunque no debe descartarse la presencia de una baja proporción de minerales de alta coercitividad. Por otro lado, las mediciones de variaciones de susceptibilidad magnética a altas temperaturas, que se realizaron en cada una de las secciones del perfil, pero como se comportaron de manera similar se tomaron las más representativas. Éstas indican temperaturas de Curie consistentes con magnetita y titanomagnetita (Figura 5).

Con respecto a los cocientes representados en la Figura 6,  $MRA/MRIS$ ,  $MRA/X$  y  $MRIS/X$  son excelentes indicadores de las variaciones relativas de tamaño de grano magnético a lo largo del perfil, siempre que la mineralogía magnética se mantenga constante a lo largo del mismo, ya que estos parámetros muestran incremento cuando el tamaño de grano magnético decrece (Blanchet *et al.*, 2007). En la  $\chi_{MRA}$  se observa un aumento paulatino hacia el techo desde los sedimentos fluviales, y otro aumento desde éstos hacia la base del perfil.

Los cocientes  $MRA/MRS$  y  $MRA/X$  muestran tendencias crecientes similares en lo que respecta al suelo actual y el loess; en ambos a -400 cm se produce un quiebre donde se observa un importante descenso en el paleosuelo I y para la base del loess. Ésta última característica podría indicar un aumento del tamaño de grano magnético. En el cociente  $MRIS/X$  se comporta especular al resto de los cocientes asciende en el paleosuelo y desciende en el suelo actual y loess.

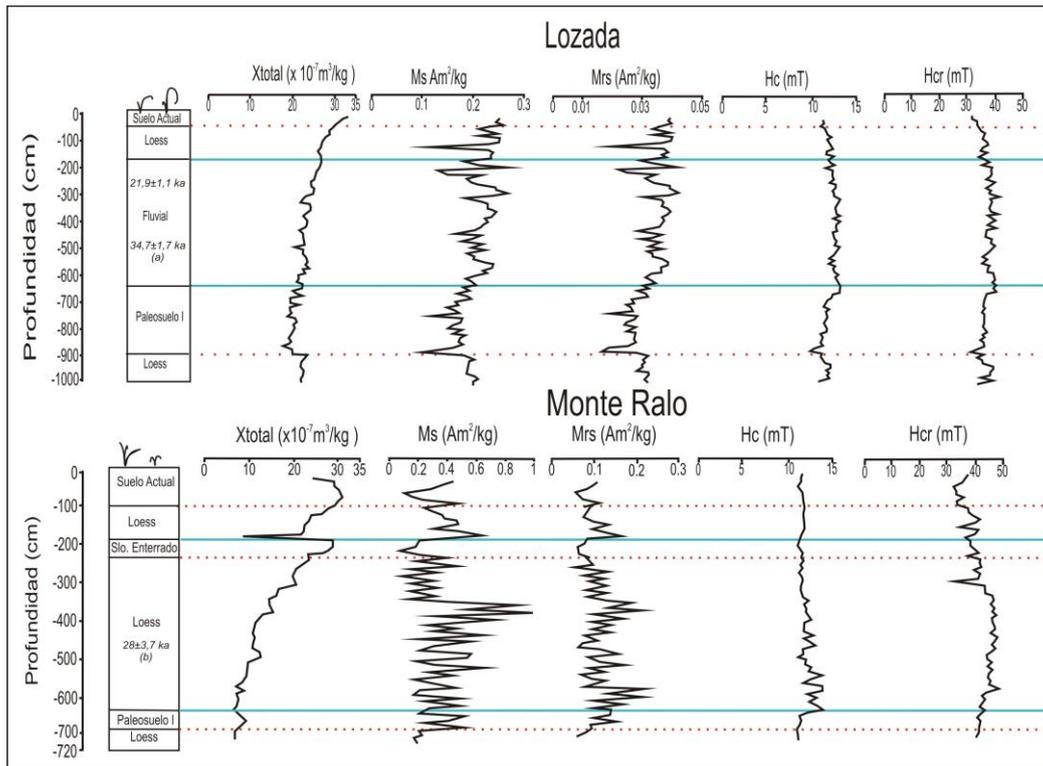
Conforme a las observaciones realizadas y sobre la base de los cocientes entre  $M_{rs}/M_s$  y  $H_{cr}/H_c$  el tamaño de las partículas magnéticas representadas en el diagrama de Dunlop (2002) se encuentran en el rango pseudo dominio simple (PDS) (Figura 7).

En el perfil de Monte Ralo se observa un incremento menor de la  $X_{total}$  en el paleosuelo I (menos del 5 % respecto al material parental) y un crecimiento en el suelo actual y en el suelo enterrado (menos del 10% respecto al material parental). Los parámetros extensivos ( $M_s$  y  $M_{rs}$ ) muestran la misma tendencia que la susceptibilidad magnética. La  $H_c$  se mantiene entre 12-13 mT y la  $H_{cr}$  entre 33-45 mT (Figura 4).

En general, la relación S-ratio se encuentra circunscripta al entorno 0,96-1, lo cual indicaría la presencia de minerales con bajas coercitividades. Sin embargo, un rasgo significativo se destaca en el paleosuelo I en la base del perfil. Allí los valores de S-ratio decrecen notoriamente hasta 0,84, lo que indicaría minerales de coercitividad alta. Las mediciones de susceptibilidad a altas temperaturas, que al igual que en Lozada se realizaron en todo el perfil y se comportaron de manera similar, también indican presencia de minerales tales como magnetita y titanomagnetita pobre en Ti (Figura 5).

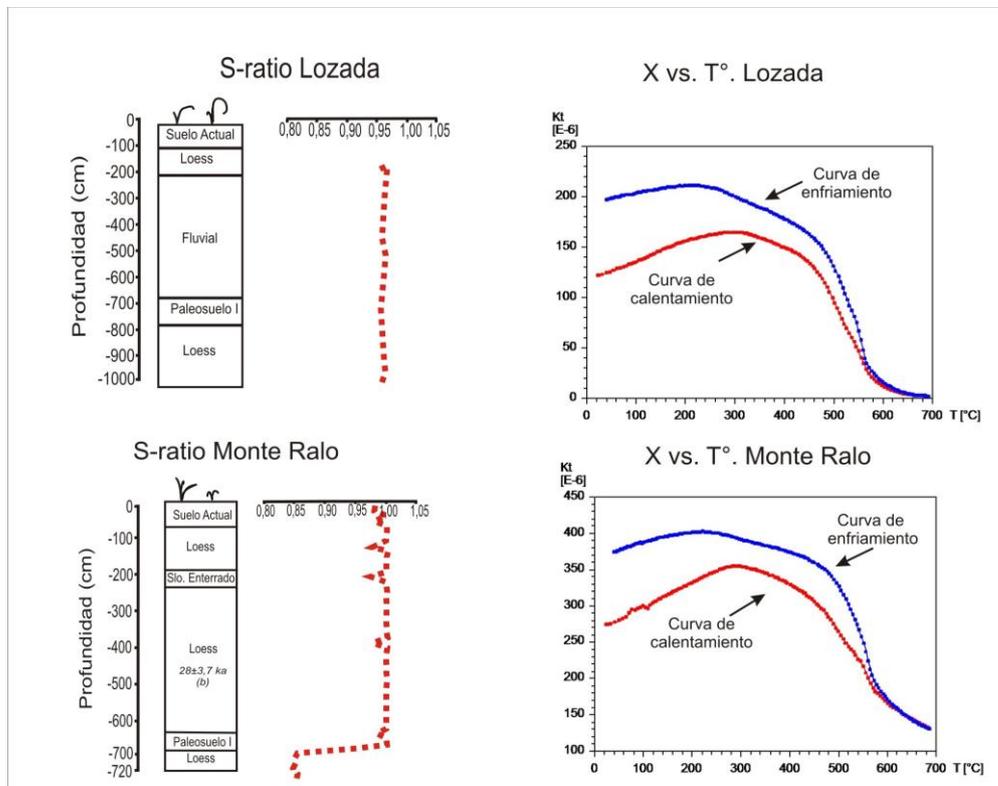
La  $\chi_{MRA}$  (Figura 6) presenta un incremento en el suelo actual, suelo enterrado y ligeramente en el paleosuelo I para luego descender en los sedimentos loessoides. Los cocientes  $MRA/MRS$  y  $MRA/X$  tienen tendencias análogas a  $\chi_{MRA}$ . La tendencia creciente de estas relaciones se interpreta como un descenso del tamaño de grano magnético, consistente con la localización de las muestras estudiadas en sectores edafizados del perfil. En el cociente  $MRIS/X$  presenta un marcado descenso en el suelo actual y en la base del loess subyacente al paleosuelo I, en el resto del perfil se mantiene sin cambios significativos.

Nuevamente, del análisis de la Figura 6 y de las relaciones entre  $M_{rs}/M_s$  y  $H_{cr}/H_c$  representadas en el diagrama de Dunlop, indican que el tamaño de las partículas magnéticas se encuentra en el campo PSD (Figura 7).



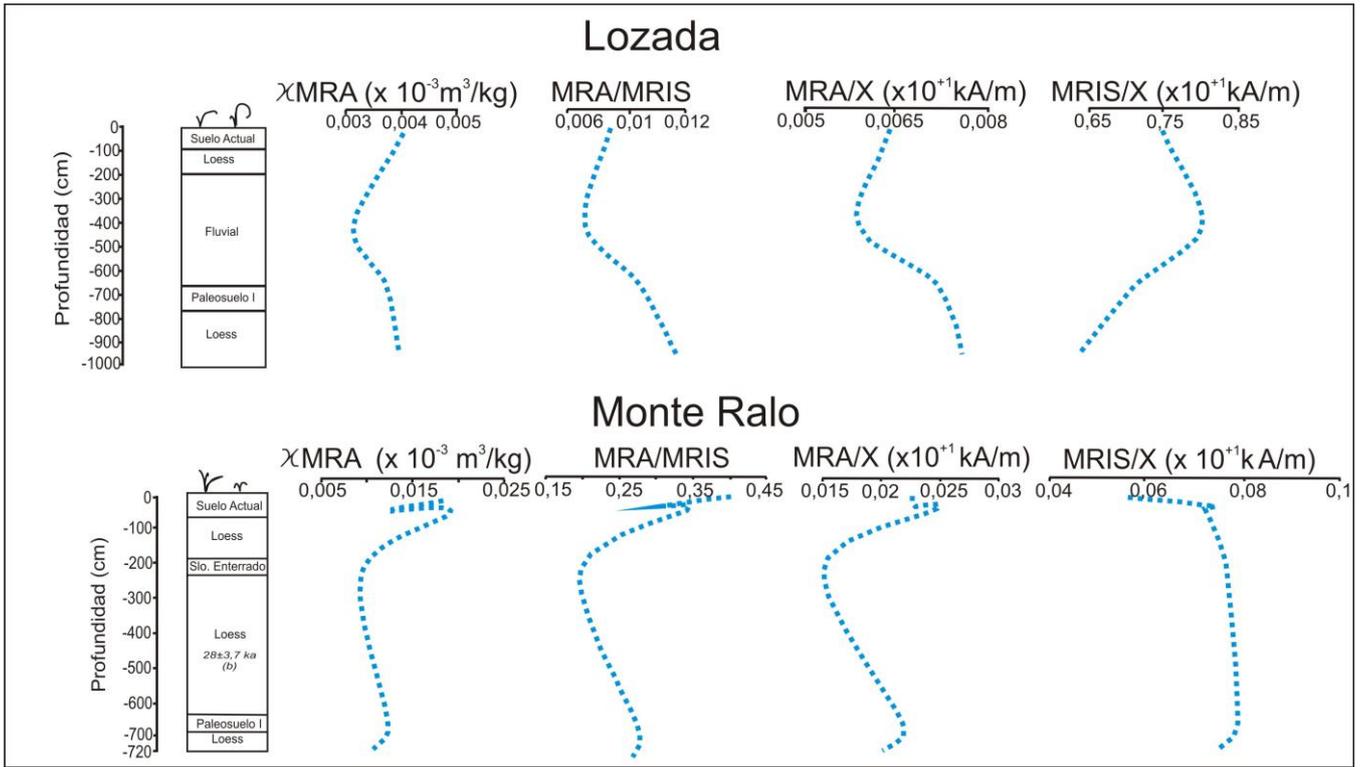
**Figura 4.** Propiedades Magnéticas de los perfiles. Susceptibilidad magnética (X), Magnetización de saturación (Ms), Magnetización remanente de saturación (Mrs), Coercitividad (Hc) y Coercitividad de remanencia (Hcr) .

**Figure 4.** Magnetic properties of the profiles. Magnetic susceptibility (X), Saturation magnetization (Ms), Saturation remanent magnetization (Mrs), Coercivity (Hc) and Coercivity of remanence (Hcr) .



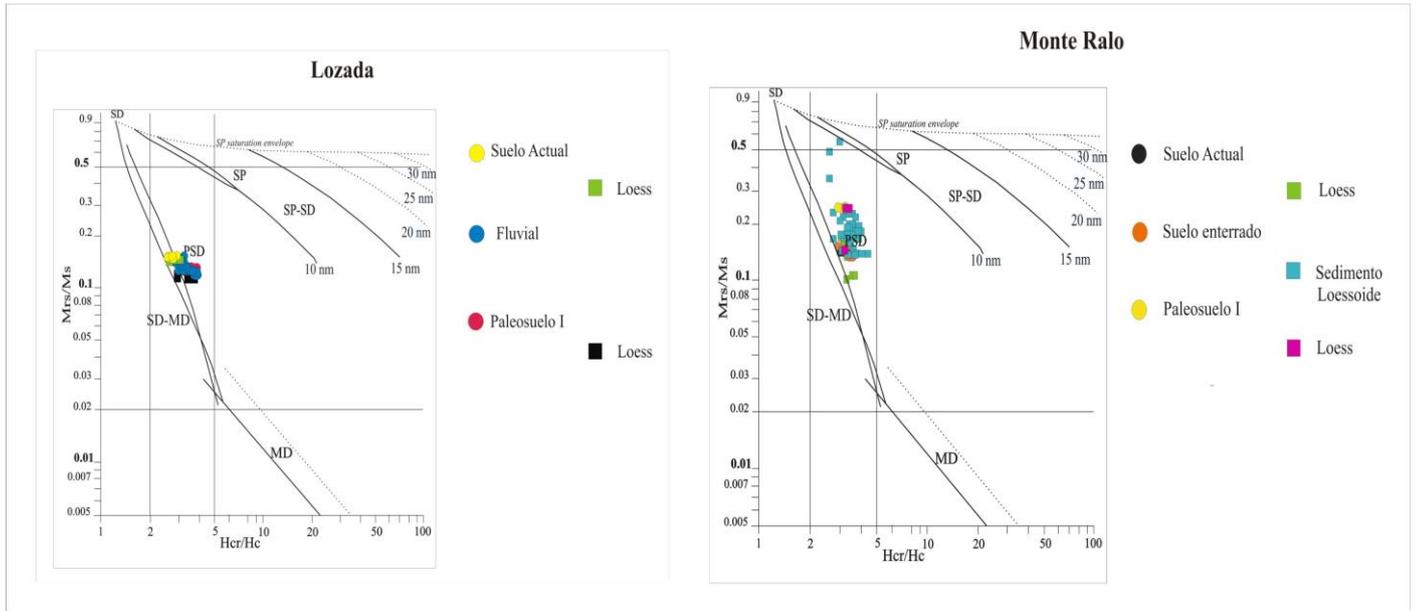
**Figura 5.** Perfiles y su relación S-ratio correspondiente. En el sector derecho de la figura se observan las variaciones de X vs. T de cada perfil.

**Figure 5.** Profiles and their corresponding S-ratio. At the right sector of the figure, high temperatures of each profile can be seen.



**Figura 6.**  $\chi$ MRA: susceptibilidad de magnetización anhistérica, MRA/MRIS: magnetización remanente anhistérica/magnetización remanente isotérmica de saturación. MRA/X: magnetización remanente anhistérica/susceptibilidad total. MRIS/X: magnetización remanente isotérmica de saturación/susceptibilidad total. Estas relaciones son indicadores de variaciones de tamaño de grano magnético.

**Figure 6.**  $\chi$ MRA: anhysteric magnetization susceptibility, MRA/MRIS: remanent anhysteric magnetization / remanent isothermic magnetization of saturation. MRA/X: remanent anhysteric magnetization / total susceptibility. MRIS/X: magnetización remanent isothermic magnetization of saturation / total susceptibility. These ratios are indicative for changes in magnetic grain size.



**Figura 7.** Gráficos de Dunlop de muestras representativas de diferentes sectores de ambos perfiles.  
**Figure 7.** Dunlop plot of both profiles.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Geomorfológicamente ambos perfiles pertenecen a una misma asociación, la Plataforma Basculada, pero se encuentran en diferentes subasociaciones; Monte Ralo en la Plataforma Basculada Plana, en un interfluvio, y Lozada, en la Plataforma Basculada Ondulada, en sedimentos aluviales con cubierta loésica.

Las dataciones obtenidas por Kemp *et al.* (2006) y Frechen *et al.* (2009) sólo permiten correlacionar con certeza los intervalos comprendidos por los sectores medios de los perfiles (Figura 2). Ambos sectores están constituidos por material retrabajado (Kemp *et al.*, 2006; Frechen *et al.*, 2009); y en el caso de Monte Ralo durante las labores de campo se detectaron, intercalaciones de estructuras sedimentarias de canal. En ambos perfiles, se trataría de depósitos presumiblemente de origen primario eólico con retrabajo fluvial, probado por: la media granulométrica general que cae en el intervalo 20-50  $\mu\text{m}$ , (limo grueso) y las estructuras sedimentarias que presenta. La variación de la media granulométrica también puede indicar diferencias con respecto a las distancias recorridas durante el transporte o distintas áreas de procedencia. Todas estas características corresponden al tipo de sedimentos mencionados en el esquema de Sanabria y Argüello (2003). Asimismo la media granulométrica en los paleosuelos de uno y otro perfil es variable; por lo tanto, la permeabilidad del material y la consecuente infiltración del agua de lluvia no es la misma. Este hecho hace que, de acuerdo al modelo cuantitativo de Orgeira *et al.* (2011) las inferencias paleoclimáticas surgidas de los resultados magnéticos sean difíciles de comparar entre ambos perfiles.

Los porcentajes de  $\text{CaCO}_3$ , son mayores en el perfil de Lozada, lo cual puede deberse a un cambio en la permeabilidad del material o que este enriquecimiento provenga, de la lixiviación de material suprayacente o por ascenso capilar (Kemp *et al.*, 2006).

Desde el punto de vista magnético se observa que tanto en el perfil de Lozada como en el de Monte Ralo hay una ligera tendencia a aumentar de la  $X_{\text{total}}$  hacia el techo de los perfiles, lo que podría indicar un mayor aporte de minerales magnéticos. Este hecho se corrobora en los otros parámetros extensivos ( $M_s$  y  $M_{rs}$ ). En particular, en el perfil de Monte Ralo se observa un cambio significativo en el techo del suelo enterrado. Un nuevo pulso de depositación eólica acompañado por un aumento gradual de la  $X_{\text{total}}$  parecería indicar una progresión hacia el techo de mayor acumulación de minerales magnéticos.

Las temperaturas de Curie registradas y las coercitividades obtenidas en las muestras estudiadas de ambos perfiles indican una analogía en la mineralogía magnética, que en ambos casos incluye magnetita y titanomagnetita, con lo que se puede inferir la misma área de aporte. La relación S-ratio entre 0,84 y 0,96 del paleosuelo I (base de la secuencia) de Monte Ralo se asocia a la presencia de minerales magnéticos de alta coercitividad tales como hematita. Este mineral es indicativo de procesos de oxidación durante la pedogénesis, vinculados a una posible mayor infiltración de agua de lluvia, producto del mayor tamaño de partícula del sedimento. No pueden descartarse condiciones climáticas más áridas que las actuales.

En el perfil de Lozada se observó que los parámetros extensivos son variables a lo largo del perfil, lo que se interpreta como representativo de cambios muy frecuentes en la cantidad de material magnético presente. En consecuencia, es probable que todo el perfil esté removilizado por agua, tal como se sugiere en Sanabria y Argüello (2003).

Con respecto al tamaño de partícula magnética, en ambos perfiles se encuentran en el campo PSD, Monte Ralo presenta una ligera dispersión, lo cual indicaría que el material que lo constituye está más retrabajado.

La relación  $\chi_{\text{MRA}}$  indica un aumento en la concentración de minerales ferrimagnéticos en el suelo actual de Lozada y el suelo actual, suelo enterrado y paleosuelo I de Monte Ralo. Los cocientes  $\text{MRA}/\text{MRIS}$ ,  $\text{MRA}/X$ ,  $\text{MRIS}/X$  sugieren en ambos perfiles una disminución del tamaño de partícula magnética hacia el techo (suelo enterrado y suelo actual), así como un aumento relativo del tamaño de partícula magnética en los sectores correspondientes a sedimentos fluviales (Lozada). El descenso observado en el paleosuelo del cociente  $\text{MRA}/\text{MRIS}$  en Monte Ralo, también puede interpretarse como agrupamiento de las partículas magnéticas pedogénicas, lo que generaría un aumento de tamaño de partícula y un consiguiente descenso de la relación mencionada (Lascu *et al.*, 2010).

El porcentaje de carbonato de calcio en Lozada, más elevado que en Monte Ralo podría ser el responsable de diluir la señal magnética y mostrar una mayor concentración de minerales magnéticos en este último perfil, y consecuentemente de mayores valores en todos los parámetros extensivos.

La diferencia en la posición topográfica entre ambos perfiles pudo generar mayor retrabajo del material en un perfil con respecto al otro. Por otro lado, diferencias en la permeabilidad de los materiales, generan condiciones diferentes para la disolución de los minerales.

## CONCLUSIONES

En síntesis se observaron variaciones de las propiedades magnéticas ( $X_{\text{total}}$ ,  $M_s$ ,  $M_{rs}$ ,  $H_c$  y  $H_{cr}$ ) poco relevantes en todos los suelos y paleosuelos, en relación a una alta variabilidad en el contenido de minerales magnéticos a lo largo del perfil, producto del retrabajo del material por agua. Luego, la escasa variación de la

Xtotal en los sectores edafizados puede deberse a una escasa exposición temporal del material parental a los efectos de la pedogénesis o bien, a que el balance de agua fue tal que se produjeron muy pocas variaciones de la mineralogía magnética. En particular, esto último fue modelado por Orgeira y Compagnucci (2006). Sobre la base de este modelo cualitativo propuesto por estas autoras se postuló que el área de Córdoba tenía una relación de media mensual de precipitación-evapotranspiración próxima a cero. En consecuencia, no eran esperables cambios sustantivos en la mineralogía magnética debidos a procesos pedogenéticos actuales o bajo condiciones paleoclimáticas análogas a las presentes. Orgeira *et al.* (2011) previeron con un modelo cuantitativo resultados similares para esta área. Finalmente, de acuerdo a las propiedades magnéticas y al modelo propuesto por los autores citados, el clima durante los períodos en los que se produjeron los paleosuelos estudiados pudo haber sido similar al actual.

Los resultados obtenidos permiten inferir que a pesar de encontrarse en una misma región, existen ligeras diferencias en la señal magnética, lo cual puede deberse a mayor presencia de carbonatos en uno de los perfiles y /o, mayor retrabajo del material.

A lo largo de ambos perfiles se detectaron variaciones de concentración de la mineralogía magnética, lo que indicaría retrabajo del sedimento por acción del agua.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen a CONICET (PIP 747/10) y a la Agencia (PICT 0382/07) por los subsidios otorgados que permitieron el desarrollo de la presente investigación. Al Geólogo Pablo Eveling por su colaboración en las tareas de campo.

## REFERENCIAS

- Ameghino, F., 1885. Informe sobre el Museo Antropológico y Paleontológico de la Universidad Nacional de Córdoba durante el año 1885. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias, Córdoba 8: 347-360.
- Ameghino, F., 1889. Contribución al conocimiento de los mamíferos fósiles de la República Argentina. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba Actas 6: 1-1027.
- Blanchet C., Thouveny N., Vidal L., Leduc G., Tachikawa K., Bard E., Beaufort L., 2007, Terrigenous input response to glacial/interglacial climatic variations over southern Baja California: a rock magnetic approach. *Quaternary Science Reviews* 26, 3118–3133.
- Boyle, J., Dearing, J., Blundell, A. and Hannam, J., 2010. Testing competing hypotheses for soil magnetic susceptibility using a new chemical kinetic model. *Geology*:38, 12: 1059-1062.
- Cantú, M., 1992. El Holoceno de la Provincia de Córdoba En M. Iriondo (Ed.) Manual del Holoceno de la República Argentina: Edición Cadinqua 1:1-24, Paraná.
- Capitanelli, R., 1979, Capítulo V. Geomorfología En: Vazquez, J.B. (ed) Geografía Física de Córdoba. Ed Boldt. Bs.As: 213-296.
- Döring, A., 1907. Serie estratigráfica del Pampeano de Córdoba. *Revista del Museo de La Plata* 14: 172-190.
- Fidalgo, F., Francesco, F. D. y Colado, U., 1973. Geología superficial en las Hojas Castelli, Cobo, J.M., y Monasterio (Pcia. de Buenos Aires). Actas del Quinto Congreso Geológico Argentino: 27-39, Buenos Aires.
- Frechen, M., Seifert, B., Sanabria, J. A. and Argüello, G. L. , 2009. Chronology of Late Pleistocene pampa loess from the Córdoba area in Argentina, *Journal of Quaternary Science*. 23: 1-12.
- Frengüelli, J., 1918. Notas preliminares sobre el subsuelo de la Cuenca Córdoba. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias, Córdoba 23(2): 203-228.
- Freytenet, P., 1971. Paleosols résiduels et paleosol alluviaux hydromorphes dan le Crétace supérieur e l'Eocène basal en Languedoc. *Revue Géographie Physique et Geologie Dynamique* 13: 245-268.
- Heller, F., Liu, X.M., Liu, T.S. and Xu, T.C., 1991. Magnetic-susceptibility of Loess in China. *Earth and Planetary Science Letters* 103: 301–310.
- Kemp, J.A, Zárate, M., Toms, P., King, M., Sanabria, J.A. and Argüello, G.L., 2006. Late Quaternary paleosols, stratigraphy and landscape evolution in the Northern Pampas, Argentina. *Quaternary Research* 66:119-132.
- Lascu, I.; Banerjee, S. y Berquó, T., 2010. Quantifying concentration of ferrimagnetic particles in sediments using magnetic methods. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11 doi:10.1029/2010GC003182.
- Maher B.A., 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 137: 25–54.
- Lisé-Pronovost, A et al., 2013. High-resolution paleomagnetic secular variation and relative paleointensity since the Late Pleistocene in Southern South America. *Quaternary Science Reviews* 71, 91-108 p.
- Orgeira, M.J. y Compagnucci, R., 2006. Correlation between paleosol-soil magnetic signal and climate. *Earth, Planets and Space (EPS)*, Special Issue " Paleomagnetism and Tectonics in Latinamerica" 58 (10) : 1373-1380.
- 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 Cs. Geológicas* V.26, núm.1 pp. 65-78.
- Orgeira, M.J. y R.H. Compagnucci, 2010. Uso de la señal magnética de suelos y paleosuelos como función climática. *RAGA* 65 (4): 612-623.

- Orgeira, M.J., Egli, R. and Compagnucci, R., 2011. A quantitative model of magnetic enhancement in loessic soils. Chapter in Earth Magnetic Interior (IAGA special Sopron book series) Springer 25: 361-368.
- Sanabria, J.A y Argüello, G., 1999. La edad de los materiales parentales loésicos de los suelos y el desarrollo del perfil, en un sector de la Plataforma basculada. Córdoba, Argentina, Actas de resúmenes del 14º Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón (Temuco) Chile, 223.
- Sanabria, J.A, y Argüello, G.L., 2003. Aspectos geomorfológicos y estratigráficos en la génesis y evolución de la Depresión Periférica, Córdoba, (Argentina), Actas del Segundo Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología: 177-184, Tucumán.
- Sanabria, J., Argüello, G. L. and Moretti, L., 2006. Implicancia Paleoambiental de los paleosuelos de un sector de la Llanura Pampeana de Córdoba. Argentina. Resumen publicado en el Taller de Cuaternario del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta.
- Santa Cruz, J., 1972. Geología al Este de la Sierra Chica (Córdoba) Valle del Río Primero. Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba I (3-4): 102-109.
- Santa Cruz, J., 1978. Aspectos sedimentológicos de las formaciones aflorantes al este de la Sierra Chica, Provincia de Córdoba. Asociación Geológica Argentina 23 (3): 232-244.
- Sayago, J.M., 1981, Rasgos geomorfológicos del territorio argentino. Unidades morfoestructurales, Atlas Total de la República Argentina, Centro Editor de América Latina 18: 284- 285.

Aceptado: 13-12-2013  
Recibido: 05-08-2013