

Propiedades magnéticas de diferentes suelos del partido de La Plata, provincia de Buenos Aires

Andrea A. BARTEL^{1,2}, Juan Carlos BIDEGAIN³ y Ana María SINITO^{1,4}

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Fac. Cs. Exactas y Nat.-UNLPam, Uruguay 151, 6300 Santa Rosa, La Pampa. E-mail: abartel@exactas.unlpam.edu.ar

³CIC-LEMIT, calle 52 e/121 y 122, 1900 La Plata, Buenos Aires.

⁴IFAS, UNCPBA, Pinto 399, 7000, Tandil.

RESUMEN. En este trabajo se reporta el análisis de parámetros magnéticos obtenidos en dos suelos, un Argiudol y un Ocracualf, de la Estación Experimental Julio Hirschorn, partido de La Plata, Buenos Aires. Ambos suelos se desarrollan sobre el mismo material parental, sedimentos loésicos, pero se ubican en diferentes posiciones topográficas y presentan diferentes condiciones de drenaje. Los principales parámetros analizados son: susceptibilidad específica (χ), susceptibilidad dependiente de la frecuencia (χ_{df}), magnetización remanente isotérmica (MRI), magnetización remanente anhística (MRA), coercitividad de la remanencia (B_{cr}) y coeficiente S. Los parámetros magnéticos (χ , MRI y MRA) indican un aumento de la concentración de minerales ferrimagnéticos hacia la base de los perfiles en ambos suelos, siendo la intensidad de los mismos notablemente menor en el Ocracualf. La χ_{df} , si bien no supera el 5%, muestra un evidente aumento en los horizontes Bt de ambos suelos. El B_{cr} y el factor S indican presencia predominante de minerales magnéticos de tipo magnetita en ambos perfiles, aunque en el Ocracualf se observa una probable contribución de minerales antiferromagnéticos (hematita-goethita) en los horizontes superficiales. El descenso de la señal de χ hacia los horizontes superficiales de los perfiles, ligado al descenso de MRI y MRA, se interpreta como consecuencia de la disolución de los óxidos de hierro detríticos. Este proceso es, en esta área, más intenso en condiciones de suelos mal drenados.

Palabras clave: Argentina, La Plata, Suelos, Minerales, Propiedades magnéticas.

ABSTRACT. *Magnetic properties of different soils from La Plata county, province of Buenos Aires.* This work presents results obtained in the magnetic study of two soils, Argiudol and Ocracualf in La Plata, Buenos Aires Province. Both soils, have been developed in the same parent material, i.e. loess, but at different topographic positions such that they were exposed to different drainage conditions. The magnetic parameters measured were: specific susceptibility (χ), frequency-dependent susceptibility (χ_{df}), isothermal remnant magnetization (IRM), anhysteretic remnant magnetization (ARM), coercivity of remanence (B_{cr}), and the S-ratio. The behaviour of magnetic parameters (χ , ARM, IRM) indicates an increase in ferrimagnetic minerals towards the base of the profiles of both soils, with lower values in the Ocracualf than in the Argiudol. Although the susceptibility frequency-dependent (χ_{df}) is lower than 5 %, the highest values -in both soils- always correspond to the Bt horizons. Coercivity of remanence and S-ratios indicate the presence of magnetite as the main ferromagnetic mineral in both soils but the upper horizons of the Ocracualf seem to be enriched with anti-ferromagnetic minerals (probably hematite and goethite). The depletion of χ , IRM and ARM values in some levels is interpreted as a consequence of pedogenetic dissolution of detritic iron minerals, a process that seems to increase markedly where bad drainage conditions prevailed.

Key words: Argentina, La Plata, Soil, Minerals, Magnetic parameters.

Introducción

En los últimos años se ha intensificado la aplicación de técnicas de magnetismo de rocas al estudio de suelos y paleosuelos, dada su alta sensibilidad a los minerales de hierro, aún en concentraciones muy bajas, y su potencial uso como indicador de procesos de formación de suelos. Estas investigaciones se basan en la hipótesis de que la variación de los parámetros magnéticos en los perfiles de suelos/paleosuelos/material parental refleja cambios ambientales. La interpretación de estas propiedades en suelos recientes y su relación con los procesos y factores pedogenéticos, es de fundamental importancia a los fines de poder establecer patrones de

comportamiento -de los parámetros magnéticos- en relación con la caracterización y sistematización edafológica.

La susceptibilidad magnética (χ) es uno de los parámetros más frecuentemente utilizados para reflejar la concentración de minerales ferrimagnéticos (magnetita-maghemita), debido a que son éstos los que fundamentalmente aportan a χ , con una señal fuerte y positiva. Así, la variación de la susceptibilidad a lo largo de un perfil se asocia a cambios en la concentración de minerales ferrimagnéticos. La magnetización remanente isotérmica de saturación (MRIS) y la magnetización remanente anhística de saturación (MRA) también son parámetros dependientes de la concentración de minerales ferrimagnéticos aunque, a diferencia de la susceptibilidad, no tan intensamen-

te afectados por los minerales para y diamagnéticos. Para caracterizar la mineralogía de los minerales magnéticos de una muestra se recurre al análisis de las curvas de adquisición de MRI, el espectro de la coercitividad de la remanencia B_{cr} (campo inverso que es necesario aplicar para reducir la MRIS a cero) y curvas de desmagnetización térmica que permiten determinar la temperatura de bloqueo de los minerales magnéticos.

Numerosos autores han analizado las propiedades magnéticas de suelos recientes (Maher 1986, 1998, Hanesch y Petersen 1999, Nabel *et al.* 1999, Dearing *et al.* 2001, Chaparro *et al.* 2002, Orgeira *et al.* 2004, entre otros) relacionándolas a productos de actividad bacteriana, diferentes condiciones de drenaje de suelos o influencia del material parental y la topografía, y a procesos de contaminación.

En este trabajo se han estudiado dos perfiles de suelos a partir de la medición de los siguientes parámetros magnéticos no direccionales: susceptibilidad magnética específica (χ), susceptibilidad dependiente de la frecuencia (χ_{df}), magnetización remanente isotérmica de saturación (MRIS), magnetización remanente anhística (MRA) y coercitividad de la remanencia (B_{cr}). Además, fueron calculados el factor S ($MRI_{-300\text{mT}}/MRIS$) y el cociente $MRIS/\chi$.

Las técnicas aplicadas permiten obtener un conjunto básico de parámetros simples que permiten distinguir minerales magnéticos naturales comunes y estimar su concentración.

Los objetivos del trabajo fueron, por un lado, caracterizar los suelos desde el punto de vista de sus propiedades magnéticas y establecer, además, una correlación entre los mismos y los principales procesos y factores pedogenéticos que afectan a los suelos.

Los perfiles estudiados corresponden a un Argiudol típico (suelo zonal) y un Ocracualf típico (suelo intrazonal). Ambos suelos se desarrollan sobre sedimentos loésicos del Holoceno (postpampeano) bajo un clima húmedo-mesotermal y se ubican en el predio de la Estación Experimental J. Hirschhorn (UNLP), partido de La Plata, provincia de Buenos Aires.

Geología general del área de estudio

Geológicamente en el área del partido de La Plata se distinguen las unidades ensinadense y bonaerense (Mauriño y Trevisán 1966) que comprenden a los considerados sedimentos pampeanos en el sentido de Fidalgo *et al.* (1975). Estas unidades son equivalentes, respectivamente, a los miembros inferior y superior de Fidalgo y Martínez (1983) y que con posterioridad Riggi *et al.* (1986) denominaron Formación Ensenada (Pleistoceno medio) y Formación Buenos Aires (Pleistoceno tardío).

Los suelos analizados en el presente trabajo se desarrollaron en sedimentos loésicos del postpampeano (Holoceno).

Geomorfológicamente el área de estudio se ubica en el extremo oriental de la denominada pampa ondulada, en la terraza alta pampiana (Frenguelli 1950) comprendida entre las cotas de 15,75 y 18,35 m s.n.m.

Los suelos pertenecen a la unidad definida como asociación Serie Estancia Chica (80 %) – Los Hornos (20 %), (Giménez y

Hurtado 1992). Presentan horizontes genéticos de fuerte desarrollo, con una secuencia de horizontes A-B₁-B₂-BC₁-BC₂-C, superando el *solum* en todos los casos el metro y medio de profundidad. Los principales procesos pedogenéticos que se observan en los perfiles son melanización, lixiviación, alteración y óxido-reducción.

El Argiudol típico se ubica en posición de loma con un drenaje moderadamente bien drenado. La textura es franco limosa a franca en el horizonte A y arcillosa en los B₁. En los horizontes BC la textura varía desde arcillosa en el BC₁ a franco limosa en el BC₂. Corresponde a los suelos de la denominada Serie Bombeador (Lanfranco y Carrizo 1973).

Los sectores más bajos del paisaje son ocupados por los Ocracualf típicos de la Serie Arroz (Lanfranco y Carrizo 1973). Estos suelos poseen serios problemas de drenaje permaneciendo frecuentemente encharcados. La textura es franco limosa a franca en los horizontes A y E y arcillosa en los B₁. En el horizonte álbico es frecuente la presencia de abundantes concreciones de hierro que se registran también, aunque menos abundantes, en el horizonte superficial.

Metodología

En primer lugar se diferenciaron los horizontes edáficos expuestos en calicatas realizadas en el predio de la estación experimental Julio Hirschhorn (34° 52' S y 57° 58' O, Fig. 1). Posteriormente se midió la susceptibilidad volumétrica (K) in situ, empleando un susceptibilímetro marca Bartington MS2 con sensor MS2F, a equidistancias de aproximadamente 5-10 cm desde la superficie y hasta la base de los perfiles. Se tomaron muestras en estos mismos puntos y el material recolectado se colocó en cilindros plásticos de aproximadamente 10 cm³. Sobre estas muestras, previamente secadas al aire y pesadas, se midió la susceptibilidad específica (χ), en alta (4700 Hz) y baja frecuencia (470 Hz), y se calculó el factor F o susceptibilidad dependiente de la frecuencia (χ_{df}), con el objetivo de estimar la presencia de minerales superparamagnéticos (SP), es decir de tamaño de grano muy pequeño ($L = 30 \times 10^{-9}$ m).

La magnetización remanente isotérmica (MRI), la magnetización remanente isotérmica de saturación (MRIS) y la coercitividad de la remanencia (B_{cr}), se determinaron mediante el uso de un magnetómetro de pulso modelo IM10-30 ASC Scientific y un magnetómetro rotativo de puerta de flujo Molspin. Las muestras fueron magnetizadas en forma gradual, aplicando campos continuos entre 13 y 1100 mT hasta alcanzar la MRIS, luego se aplicaron campos reversos para obtener los valores de B_{cr} .

La magnetización remanente anhística (MRA) se determinó con un equipo de MRA adosado a un desmagnetizador magnético Molspin y el magnetómetro rotativo mencionado anteriormente. Se utilizó un campo alterno de 100 mT y uno continuo de hasta 90 μ T.

Con el objeto de completar las mediciones magnéticas obtenidas por los métodos anteriores se realizó la desmagnetización térmica de las muestras, en un horno desmagnetizante modelo TD 48 ASC Scientific. Esto permitió conocer la temperatura de bloqueo de los minerales ferrimagnéticos presentes.

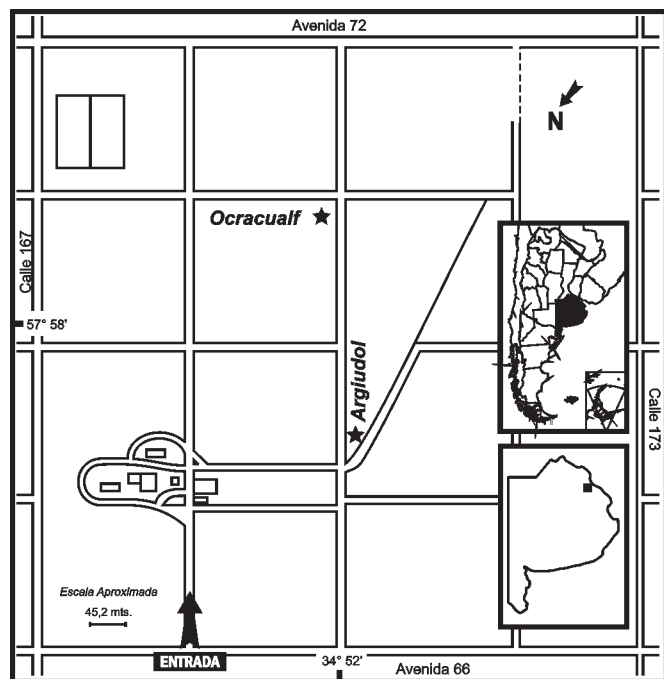


Figura 1: Ubicación de los perfiles estudiados en la Estación Experimental J. Hirschhorn, La Plata.

Las mediciones fueron realizadas en el Instituto de Física Arroyo Seco (IFAS) de la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires.

Análisis de los resultados

Susceptibilidad

La figura 2 muestra los resultados de las mediciones de susceptibilidad volumétrica (k), susceptibilidad específica a baja frecuencia (χ_{LF}) y el factor F ó susceptibilidad dependiente de la frecuencia de los perfiles estudiados.

En el Argiudol típico los valores de χ_{LF} varían entre 75 y 130 $\cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{Kg}$, aumentando, al igual que K , hacia la base del perfil. Se observa una marcada estabilidad de los registros de χ hasta una profundidad de 30 cm (horizonte A y parte superior del B_{11}), con valores de alrededor de 80 $\cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{Kg}$, luego se incrementan abruptamente en el horizonte B_{11} hasta 125 $\cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{Kg}$ en la base del mismo, y vuelven a estabilizarse en los horizontes B_{12} y BC (alrededor de 130 $\cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{Kg}$).

El Ocracualf típico se caracteriza por muy bajos valores de χ_{LF} , especialmente en la parte superior del perfil (horizontes A y E $< 15 \cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{Kg}$). En el horizonte B_{11} se distinguen dos sectores con diferente comportamiento magnético: el sector superior presenta valores ligeramente superiores a los de los horizontes suprayacentes, mientras que en el sector inferior la susceptibilidad se incrementa abruptamente alcanzando valores de aproximadamente 40 $\cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{Kg}$. A partir del límite B_{t1}/B_{t2} la susceptibilidad aumenta progresivamente y alcanza máximos de 64 $\cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{Kg}$ en la base del horizonte B_{12} . El estudio no alcanzó mayores profundidades debido al nivel freático elevado en el momento de realizar el muestreo.

Los niveles más profundos de este perfil (B_{t2}) presentan valores de susceptibilidad 50 % por debajo de los registrados en el Argiudol para el mismo horizonte edáfico. Por otra parte el sector superficial del Ocracualf (horizontes A y E) presenta una disminución relativa de los valores aún más marcada (Fig. 2).

La presencia de granos magnéticos de dominio superparamagnético (SP) puede ser estimada cualitativamente a través del análisis de la susceptibilidad dependiente de la frecuencia (χ_{df}) o factor F , definido como: $(\chi_{470\text{Hz}} - \chi_{4700\text{Hz}}) / \chi_{470\text{Hz}} \times 100$. Este factor es sensible a la presencia de granos SP, especialmente en tamaños de 13 a 27 nanomicros. Los valores registrados en este estudio, se encuentran dentro del rango comúnmente hallado en suelos actuales (Dearing *et al.* 1996; Chaparro *et al.* 2002). Varían entre 2.5 y 4.7 % en el Argiudol y entre 0 y 4.5 % en el Ocracualf. Se evidencia una tendencia al incremento del factor F en el horizonte B_{11} en ambos perfiles (Fig. 2) y un decrecimiento hacia los niveles basales del horizonte B_{12} y en el horizonte BC, lo que indicaría que estos granos magnéticos no derivan del material parental sino que se habrían originado durante el desarrollo de los horizontes superiores del suelo.

Magnetización remanente isotérmica (MRI) y anhistérmica (MRA)

Las curvas de MRI muestran un rápido incremento inicial hasta campos de 100 mT en todas las muestras analizadas de ambos perfiles. A campos de ≈ 300 mT se alcanza el 95 % de la MRIS en todos los horizontes del Argiudol. En el Ocracualf los valores de MRI alcanzados (en porcentaje de la MRIS) a 300 mT son también elevados, aunque menores, con un mínimo de 86 % en el horizonte E. En el horizonte A se alcanza el 90 % de la MRIS y el 94 % en el B_{11} . Este comportamiento indica que la presencia de magnetita condiciona el comportamiento de este parámetro, aún en bajas concentraciones (Figs. 3a y 3b).

En general se observa en ambos perfiles un aumento de la MRIS con la profundidad de muestreo, es decir a medida que nos acercamos al material parental (Fig. 4).

En el Argiudol la MRIS varía entre 10451 $\cdot 10^{-3}$ A/m en el horizonte A y 24847 $\cdot 10^{-3}$ A/m en el BC. Los valores son relativamente homogéneos, alrededor de 10000 $\cdot 10^{-3}$ A/m, hasta una profundidad de 30 cm. En la base del horizonte B_{11} se produce un incremento a valores aproximados de 14000 $\cdot 10^{-3}$ A/m, que se acentúa en el horizonte B_{12} y alcanza el máximo, de aproximadamente 25000 $\cdot 10^{-3}$ A/m, en el horizonte BC.

Las intensidades de MRIS en el Ocracualf -al igual que la susceptibilidad- son muy inferiores respecto del Argiudol. Varían entre 1499 y 10671 $\cdot 10^{-3}$ A/m. Los mínimos se registran en los horizontes A, E y el sector superior del B_{11} hasta los 35 cm de profundidad. A partir de estos niveles se incrementan en forma constante y abrupta hacia la base del perfil, alcanzando en el horizonte B_{12} valores cinco veces superiores a los registrados en el A.

Los valores de MRIS muestran muy buena correlación con los de χ en ambos perfiles (factor R : 0.98), lo que indicaría que no existe un aporte importante de material paramagnético. Esto se debe a que χ depende no sólo de la concentración de minerales capaces de retener magnetización una vez removi-

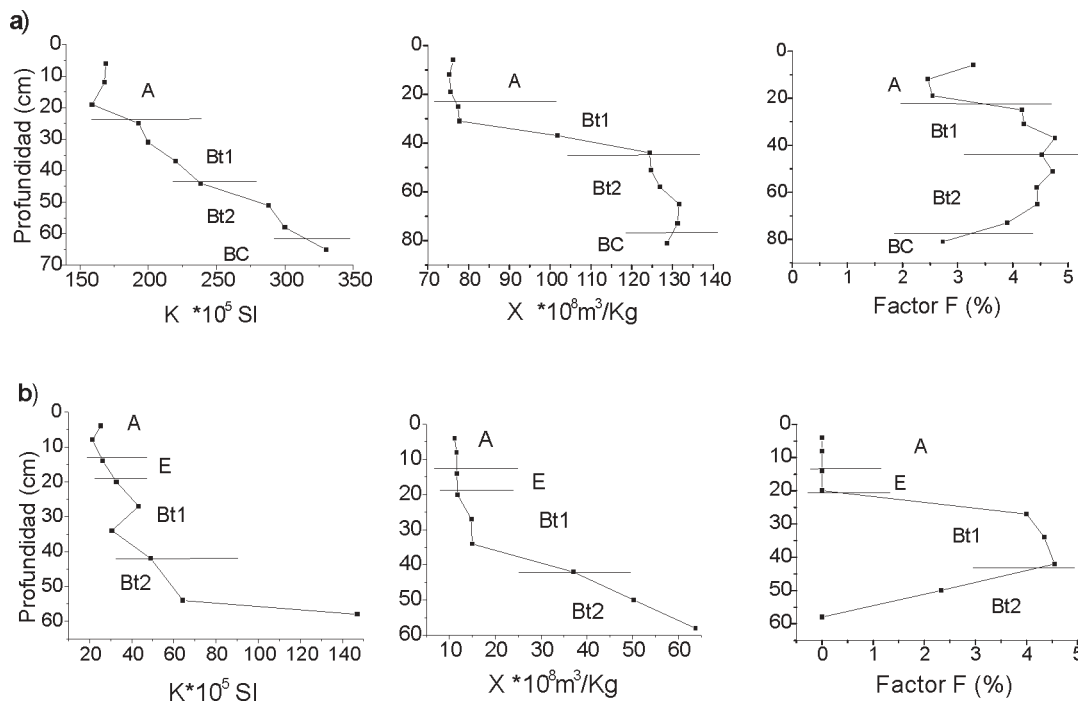


Figura 2: Valores de susceptibilidad volumétrica (K), específica (χ_{sp}) y factor F de los diferentes horizontes de los suelos estudiados. A-E-Bt1-Bt2-BC indican nomenclatura de horizontes. Las líneas horizontales marcan los límites entre los horizontes. **a)** Argiudol típico. **b)** Ocracualf típico.

dos los campos magnéticos inductivos, (ferromagnéticos: antiferromagnéticos y ferrimagnéticos) sino de los materiales paramagnéticos. Es importante destacar, que cuando la presencia de minerales ferromagnéticos es significativa (por ej.: concentraciones de magnetita $> 0.01\%$) las variaciones relativas de ambos parámetros (χ y MRIS) será similar, por el contrario, diferirán para concentraciones menores, en tal caso la señal magnética es dominada por la contribución paramagnética (a pesar de las grandes diferencias en magnitud entre materiales).

La relación $MRIS/\chi$ no es constante con la profundidad del perfil, aunque la variabilidad no es importante (8-11 kA/m en el Argiudol y 6-11 kA/m en el Ocracualf). La misma muestra un ligero incremento hacia la base del perfil en el Argiudol e igual comportamiento desde el horizonte Bt1 hacia la base del perfil en el Ocracualf, mientras que en los horizontes A y E de éste último se registran los mayores valores de $MRIS/\chi$ (9.9 y 11 kA/m respectivamente). Ese incremento puede estar vinculado a la presencia de un porcentaje reducido de material antiferromagnético (como hematita) que eleve el valor del cociente o un decrecimiento del tamaño de grano (Thompson y Olfield 1986). En este último caso, se debe asumir que hay una predominancia manifiesta de material ferrimagnético, para tomar el cociente $MRIS/\chi$ como un buen indicador de variaciones de tamaño de grano (Banerjee 1981, Tauxe 1993). Ambos perfiles muestran relaciones $MRIS/\chi$ similares, aunque en el Argiudol éstas se deben a altos valores tanto de MRIS como de χ , mientras que en el Ocracualf ambos valores son bajos, indicando mayor concentración de minerales ferrimagnéticos en el primero.

La magnetización remanente anhistérica, junto con la

susceptibilidad y la magnetización remanente isoterma, es otro parámetro sensible a la concentración y también al tamaño de grano de los minerales ferrimagnéticos presentes en una muestra. Esto se evidencia al comparar las curvas de MRA en función de la profundidad de los dos tipos de suelos (Fig. 4). En ambos, la mayor concentración de minerales ferrimagnéticos se asocia a los niveles basales, aunque como se indica los valores más bajos del Argiudol están en el orden de los más altos del Ocracualf. En el primero se registraron valores entre $504 - 1010 \cdot 10^{-3}$ A/m, mientras que en el Ocracualf las intensidades de MRA fueron muy inferiores ($47 - 478 \cdot 10^{-3}$ A/m).

Para evaluar la proporción relativa de la fracción ferrimagnética se utilizó el coeficiente S ($S = IRM_{300}/SIRM$). Valores cercanos a 1 indican que la saturación se debe a la predominancia de minerales ferrimagnéticos, tales como magnetita/maghemita, mientras que a medida que este coeficiente se aleja de 1, muestra el aporte de minerales antiferromagnéticos tales como hematita-goethita.

El Argiudol se caracteriza por presentar altos valores de S en todo el perfil, alrededor de 0.90, con un ligero incremento hacia la base. Este coeficiente es inferior en los horizontes superiores A, E y B_{t1} del Ocracualf (0.78, 0.79 y 0.72 respectivamente), aumenta a 0.82 en el límite B_{t1}/B_{t2} y alcanza un máximo de 0.87 en el horizonte B_{t2} . En la figura 3 se indican los valores de S obtenidos para los horizontes A y B_{t2} de ambos suelos.

La coercitividad de la remanencia (B_{cr}), es un parámetro útil en la diferenciación de minerales magnéticos. En el Argiudol varía entre 36-39.5 mT, mostrando un leve incremento hacia el horizonte BC. En el Ocracualf, se registran valores de B_{cr} que alcanzan a 70 y 67 mT en los horizontes A, E y B_{t1} respectivamente y coinciden con los mínimos de S . El valor obtenido por

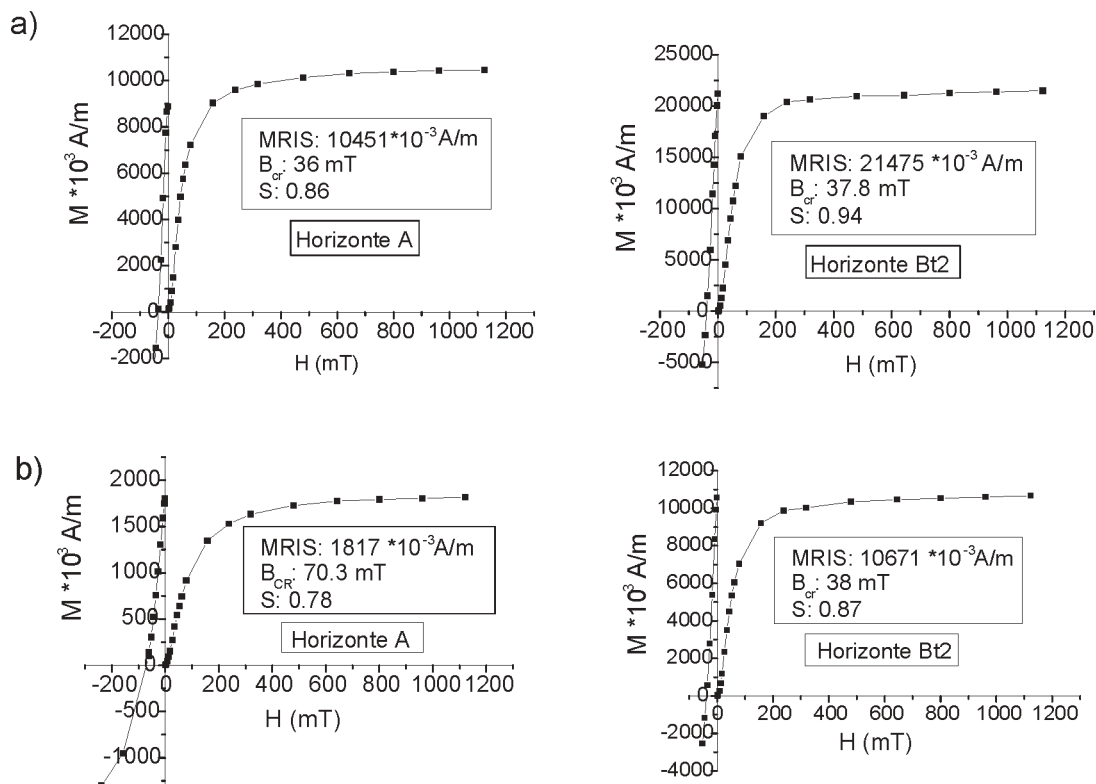


Figura 3: Curvas de adquisición de MRI para los horizontes A y Bt2. a) Argiudol típico. b) Ocracualf típico

esta vía también indica la presencia de minerales de alta coercitividad en estos horizontes, como se indicó más arriba, minerales antiferromagnéticos del tipo hematita-goethita. Hacia la base del B_{11} y en el horizonte B_{12} el valor de B_{cr} disminuye a 38 mT.

Finalmente se realizó la desmagnetización térmica sometiendo las muestras analizadas a temperaturas superiores a 600 °C. En la figura 5 se observa el comportamiento térmico de muestras representativas de cada horizonte de un Argiudol típico del predio y una muestra del horizonte B_{11} del Ocracualf. La completa desmagnetización se alcanza a temperaturas próximas a 685 °C. La inflexión en torno de los 200 °C y la caída total de la intensidad a temperaturas por encima de la temperatura crítica (575 °C), evidencian la presencia de fases más oxidadas que magnetita en todos los horizontes. Los comportamientos termomagnéticos de muestras de loess y paleosuelos evidencian también la inflexión de la curva a temperaturas similares aunque algo más bajas, alrededor de 150 °C, (van Velzen y Dekkers 1999, Bidegain *et al.* 2005). Según los autores mencionados, este comportamiento se asocia a anillos de oxidación superficial, en el proceso de calentamiento, con formación de maghemita. En el Ocracualf, el comportamiento es similar al observado en el Argiudol aunque con una coercitividad aún más marcada, es decir, la desmagnetización excede claramente los 600 °C.

Concentración de magnetita y tamaño de grano

Una estimación aproximada del tamaño de grano magnético puede obtenerse de la relación entre MRIS y K. Thompson y

Oldfield (1986, capítulo 4, figura 4.9), utilizan una representación bilogarítmica de MRIS vs K para estimar el tamaño de grano y concentración de magnetita. Ubicando los valores de los parámetros magnéticos de las muestras aquí estudiadas en dicho gráfico, se observa que la concentración de magnetita varía entre 0,01 y 0,1 % en todos los horizontes correspondientes al Argiudol, mientras que en el Ocracualf la concentración es menor a 0,01 % en los horizontes A, E y B_{11} y entre 0,01-0,1 % en el horizonte B_{12} . En ambos perfiles la concentración aumenta hacia la base. Estos resultados coinciden con el aumento, en el mismo sentido, de la susceptibilidad y saturación de la magnetización remanente isoterma y anhistérica. En cuanto al tamaño de grano magnético, en este mismo gráfico puede observarse que todas las muestras, de ambos perfiles, se ubican en el rango de 8-16 μm .

Discusión

Los resultados de las mediciones magnéticas conducen a una división del perfil que coincide básicamente con la descripción realizada bajo normas edafológicas convencionales.

Una mayor profundidad relativa alcanzada en el perfil del Argiudol permite distinguir tres zonas de susceptibilidad magnética: una de valores bajos en el sector superior del perfil correspondiente a los horizontes A y parte superior del B_{11} , una zona de valores intermedios correspondiente al horizonte B_{11} y una tercer zona de valores más elevados en los horizontes B_{12} y BC. Los parámetros MRIS y MRA permiten asimismo identificar estas tres zonas de manera clara.

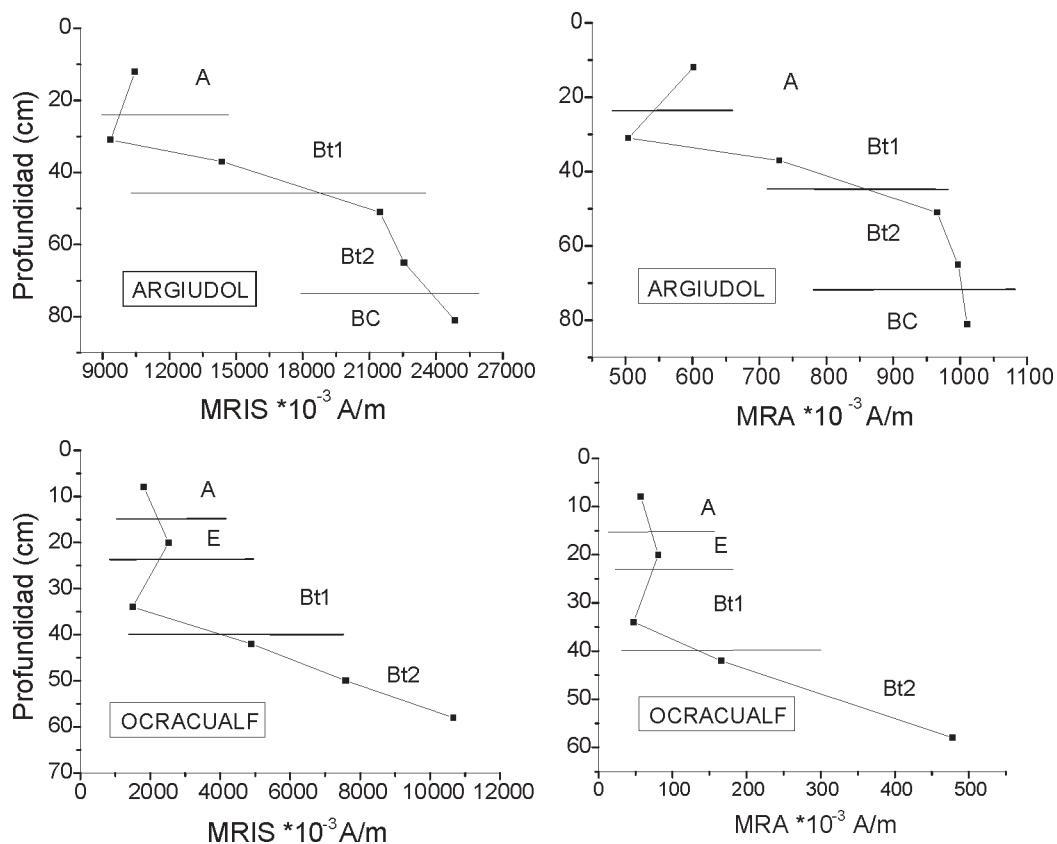


Figura 4: Valores de MRIS y MRA vs. profundidad en ambos perfiles.

El Ocracualf muestra sólo dos zonas distintivas: una sección superficial, hasta 35 cm de profundidad aproximadamente, caracterizada por muy bajos valores de χ , MRIS y MRA y una zona de transición, a partir del tope del horizonte B_{t2}, en la que estos parámetros magnéticos rápidamente se incrementan hacia la base del perfil.

En ambos suelos este comportamiento indica un aumento en la concentración de minerales ferrimagnéticos hacia la base del perfil, es decir hacia el material parental o, lo que es lo mismo, una disminución de la concentración de minerales ferrimagnéticos hacia los sectores superficiales de los perfiles. Los valores significativamente más elevados registrados en el Argiudol respecto del Ocracualf indican que la concentración de minerales ferrimagnéticos es mayor en el primero.

Este decrecimiento de los valores de susceptibilidad (*depletion*) respecto del material originario fue descrito por Maher (1998), entre otros. En el plano local se podría relacionar con el comportamiento observado en sedimentos del Pleistoceno sometidos a condiciones subácueas durante largos períodos del año (*waterlogging*). Estas condiciones habrían generado la alteración de los minerales presentes —entre ellos, los ferromagnéticos— y la consecuente lixiviación del hierro en su forma reducida, mucho más soluble, seguida de reprecipitación en forma de compuestos de hierro más oxidados en los niveles infrayacentes (Orgeira *et al.* 1998, 2003, Bidegain *et al.* 2001).

La escasa dispersión de los valores de susceptibilidad en

los horizontes superficiales tanto del Argiudol como del Ocracualf podría estar relacionado a la influencia de la materia orgánica en la movilidad de los óxidos y oxihidróxidos del suelo.

El factor F es en general bajo, inferior a 5% en todas las muestras, es decir que si bien no se descarta un aporte de minerales superparamagnéticos en estos suelos, la producción pedogenética de magnetita ultrafina con comportamiento SP en estos suelos no es pronunciada (Heller *et al.* 1991). En líneas generales el factor F tiende a ser más elevado en los horizontes arcillosos, especialmente en el B_{t1}. En este contexto cabe señalar que los estudios realizados en loess y paleosuelos de La Plata revelan que el factor dependiente de la frecuencia se incrementa en relación con horizontes B (máximos de aproximadamente 7%) y decrece en relación con horizontes BC y C (Bidegain *et al.* 2001).

La forma de las curvas de adquisición de MRI y el elevado porcentaje de magnetización alcanzado por debajo de los 300 mT (95%), indican dominancia de minerales ferrimagnéticos en ambos perfiles, aunque valores comparativamente inferiores en el sector superior del Ocracualf (86%) sugieren el aporte de minerales antiferromagnéticos.

Valores de B_{cr} de 33 mT, corresponderían a magnetita dominio simple, mientras que valores de 20–40 mT se indican como rango característico de granos de magnetita relativamente gruesos (Thompson y Oldfield 1986, Dunlop y Ozdemir 1997). Los valores de B_{cr} registrados en el Argiudol, 36–39 mT, y en

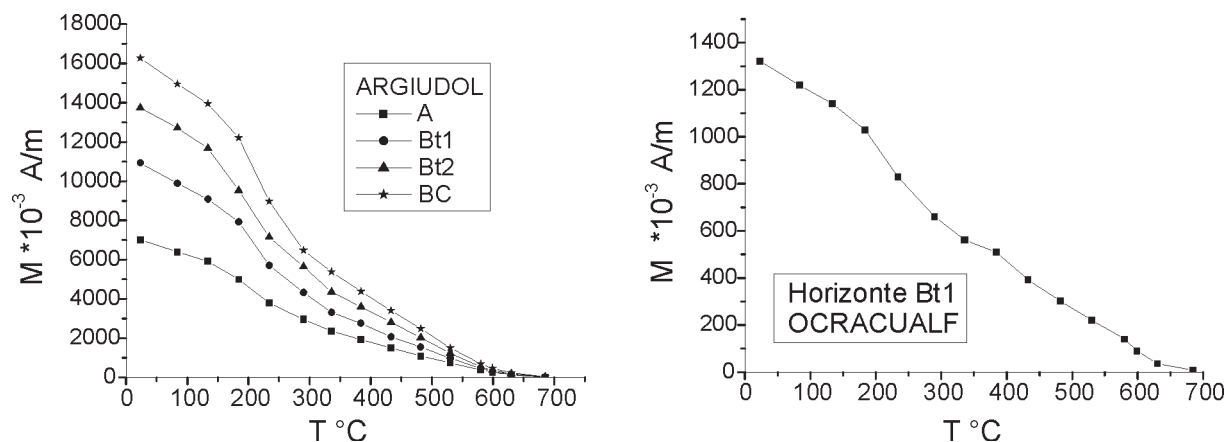


Figura 5: Curvas de desmagnetización térmica de un Argiudol típico del predio y horizonte Bt1 del Ocracualf.

la base del Ocracualf, 38 mT, indican la presencia de magnetita de grano más grueso que dominio simple, mientras que los valores de ≈ 70 mT, en el sector superficial del Ocracualf, sugieren la presencia de minerales antiferromagnéticos del tipo hematita-goethita o material ferrimagnético más fino. La presencia de concreciones de hierro en estos horizontes, que prácticamente no responden a la influencia de un imán de mano, sumado a un factor F nulo inclinan a descartar que este aumento en los registros de Bcr responda a la presencia de material ferrimagnético más fino.

En cuanto al coeficiente S, los valores registrados son elevados en el Argiudol y base del Ocracualf ($\approx 0,90$). Se registran valores inferiores, aunque mayores a 0,70, en el sector superficial del Ocracualf, coincidiendo con el sector de mayores Bcr. Se interpreta que si bien el nivel de saturación se debe a la predominancia de minerales ferrimagnéticos, tales como magnetita, particularmente en los horizontes superficiales del Ocracualf existe una contribución de minerales anti-ferrimagnéticos como hematita-goethita.

Los resultados obtenidos evidencian la sensibilidad de las técnicas utilizadas. Es decir, diferentes condiciones de formación de suelo generan diferencias significativas en las propiedades magnéticas, aún en el caso de suelos desarrollados sobre un mismo material parental y distantes uno del otro no más de 300 metros. La disolución de los óxidos de hierro magnéticos es un proceso presente en ambos suelos aunque dominante en el Ocracualf y es responsable de la caída neta de la señal magnética (*depletion*). Esto reviste importancia en el estudio de las condiciones ambientales y paleoambientales en sedimentos del Cuaternario, por otra parte es indicador de variaciones topográficas locales y formas de drenaje en un área específica.

Conclusiones

Los parámetros magnéticos utilizados (c, MRIS, MRA, Bcr, F y S) indican que es posible distinguir y caracterizar horizontes de suelos sobre la base de la metodología empleada. Los horizontes magnéticos establecidos coinciden básicamente con los diferenciados por métodos edafológicos convencio-

nales y permitirían un ajuste de los límites a partir de la movilidad del hierro y la capacidad de neoformación de los óxidos y oxihidróxidos bajo condiciones ambientales específicas.

Los suelos zonales en el partido de La Plata (Argiudoles típicos), presentan un diseño de la curva de susceptibilidad que se corresponde con la obtenida por otros autores en paleosuelos de las Formaciones Buenos Aires y Ensenada, en el sentido de que los valores magnéticos se incrementan desde el horizonte A hasta el C (material parental).

Los suelos intrazonales como el estudiado (Ocracualf), desarrollados bajo condiciones de mayor humedad, muestran el mismo patrón general de susceptibilidad aunque con valores muy inferiores. Esto constituye un ejemplo reciente de fenómenos de alteración (disolución en medio acuoso) de minerales ferrimagnéticos (magnetita) y neoformación de compuestos más oxidados (Fe_2O_3 y FeOOH) del tipo hematita o goethita.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a las siguientes instituciones. Conicet, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de la Pampa, Lemit (CIC), IFAS (UNCPBA). Un agradecimiento especial al Ingeniero Jorge Asborno, Director de la Estación experimental J. Hirschhorn, por su desinteresada colaboración en las tareas de campo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Banerjee, S. K. 1981a. Experimental methods of rock magnetism and paleomagnetism. *Advances in Geophysics* 23: 25-99.
- Bidegain, J.C. 1991. Sedimentary development, magnetostratigraphy and sequence of events of the Late Cenozoic in Entre Rios and surrounding areas in Argentina. Ph.D. thesis, Stockholms University. Akademityck AB, (inédita) 128 p., Edsbruk.
- Bidegain, J.C., van Velzen, A. y Rico, Y. 2001. Parámetros magnéticos en una secuencia de loess y paleosuelos del Cenozoico tardío en la cantera de Gorina, La Plata: su relevancia en el estudio de los cambios paleoclimáticos y paleoambientales. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56(4): 503-516.
- Bidegain, J.C. 1994. Estudio Geológico y Paleomagnético en Sedimen-

- tos Portadores de Fauna Pleistocena en Hernández, La Plata, República Argentina. 5° Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 265-270.
- Bidegain, J.C., Evans, M. y Van Velzen, A. 2005. A magnetoclimatological investigation of Pampean Loess, Argentina. *Geophysical Journal International* 160: 55-62.
- Chaparro, M., Gogorza, C., Lavat, A., Pazos, S. y Sinito, A. 2002. Preliminary results of magnetic characterisation of different soils in the Tandil region (Argentina) affected by the pollution of metallurgical factory. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 7: 35-58.
- Dearing, J. A., Hannam, J., Anderson, A. and Wellington, E. 2001. Magnetic, geochemical and DNA properties of highly magnetic soils in England. *Geophysical Journal International* 144: 183-196.
- Dunlop, J. y Ozdemir, O. 1997. *Rock magnetism. Fundamentals and frontiers.* Cambridge University Press 573 p.
- Fidalgo, F., Colado, U. y de Francesco, F.O. 1973. Sobre intrusiones marinas cuaternarias en los partidos de Castelli, Chascomús y Magdalena (Pcia. de Buenos Aires). 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 27-39, Buenos Aires.
- Fidalgo, F. y Martínez, O.R. 1983. Algunas características geomorfológicas dentro del Partido de La Plata (Buenos Aires). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 38(2): 263-279.
- Gimenez, J., Hurtado, M., Cabral, M. y Da Silva, M. 1992. Estudio de Suelos del Partido de La Plata. Etapa I: sector Oeste-Noroeste. Convenio consejo Federal de Inversiones- FCN y Museo, UNLP. Informe de tirada reducida: 180 p. (inédito)
- Hanesch, M. y Petersen, N. 1999. Magnetic properties of a recent parabrown-earth from Southern Germany. *Earth and Planetary Science Letters* 169: 85-97.
- Heller, F., Liu, X., Liu, T., y Xu, T. 1991. Magnetic susceptibility of loess in China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 103: 301-310.
- Lanfranco, J. y Carrizo, R. 1973. Carta de suelos de la Estación Experimental Central. Fac. Agronomía- Ministerio de As. Agrarias (inédito) 19 p., La Plata.
- Maher, B.A. 1986. Characterisation of soil by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth Planetary Interiors* 42: 76-92.
- Maher, B.A. 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 137: 25-54.
- Mauriño, V. y Trevisán, S. 1966. Condiciones geológicas y geomecánicas del subsuelo de la ciudad de La Plata y sus alrededores. *Proceedings of the 2nd Panamerican Conference on soil mechanics and foundation Engineering, Brasil. LEMIT, Serie II(106): 3-24.*
- Nabel, P., Morrás, H., Petersen, N. y Zech, W. 1999. Correlation of magnetic and lithologic features of soils and Quaternary sediments from the Undulating Pampa, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 12: 311-323.
- Orgeira, M. J., Walther, A., Vásquez, C., Di Tomasso, I., Alonso, S., Sherwood, S., Yuang Hu y Vilas, J. 1998. Mineral magnetic record of paleoclimate variation in loess and paleosols from Buenos Aires Formation (Buenos Aires, Argentina) *Journal of South American Earth Sciences* 11(6): 561-570.
- Orgeira, M. J., Walther, A. y Vásquez, C. 2003. Magnetismo ambiental: estado actual de desarrollo en Argentina. Su aplicación a paleoclimas. 2° Congreso de Cuaternario y Geomorfología, Actas: 129-136, Tucumán.
- Orgeira, M. J., Pereyra, F., Vásquez, C., Castañeda, E. y Compagnucci, R. 2004. Señal magnética en suelos actuales de la provincia de Buenos Aires, Argentina: su relación con el clima. *Geotemas* 6(4): 311-315.
- Riggi, J.C., Fidalgo, F., Martínez, O. y Porro, N. 1986. Geología de los "sedimentos pampeanos" en el Partido de La Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 49(3-4): 316-333.
- Tauxe, L. 1993. Sedimentary records of relative paleointensity of the geomagnetic field: Theory and practice. *Reviews of Geophysics* 31(3): 319-354.
- Thompson, R. y Oldfield, F. 1986. *Environmental magnetism.* Allen Unwin, 225 p., London.
- Van Velzen, A. y Dekkers, M., 1999. Low-temperature oxidation of magnetite in loess-paleosol sequences: A correction of rock magnetic parameters. *Studia Geophysica et Geodaetica* 43: 357-375, Prague.

Recibido: 28 de agosto, 2004

Aceptado: 13 de julio, 2005