



## SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA Y POSIBILIDAD DE APLICACIÓN PARA LA GÉNESIS Y CARTOGRAFÍA DE SUELOS EN MISIONES

Moretti, L.M.<sup>1\*</sup>, H.J.M. Morrás<sup>2</sup>, S.E. Barbaro<sup>1</sup>, F.A. Alvarenga<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INTA Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul; <sup>2</sup> INTA Instituto de Suelos, Castelar;  
\* Ruta Nacional 14, km 836, (3313) Cerro Azul, Prov. de Misiones, [moretti.lucas@inta.gob.ar](mailto:moretti.lucas@inta.gob.ar)

**RESUMEN:** Los óxidos de hierro influyen en diversas propiedades físicas, químicas y físico-químicas de los suelos. Son utilizados como indicadores de procesos pedogenéticos, ya que de acuerdo con el ambiente edáfico, forman diferentes minerales magnéticos que pueden estudiarse con diversas metodologías. En particular, la Susceptibilidad magnética (SM) es una técnica de bajo costo que provee información que depende del tipo, abundancia y tamaño de grano de estos minerales. El objetivo de la presente contribución es evaluar la utilización de la SM como complemento al estudio de la génesis y cartografía de los suelos dominantes de Misiones. Para tal fin, se estudian tres perfiles ubicados en el departamento de Leandro N. Alem, dos de los cuales pertenecen al grupo de los "suelos rojos" (Ultisol y Alfisol) desarrollados en posición de media loma y otro al grupo de los "suelos pedregosos" (Molisol) ubicado en posición de media loma baja. Se realizó la descripción morfológica y el muestreo de los perfiles a campo y se midió la SM en masa en laboratorio. Los resultados muestran tendencias similares para los suelos rojos, con aumentos graduales hacia la superficie en función de la concentración de magnetita derivada del basalto en ese sentido. Sin embargo los valores absolutos en el Ultisol duplican al Alfisol, indicando el mayor grado de evolución del primero. En el Molisol los valores son bajos en el suelo y aumentan en el saprolito. El menor grado de desarrollo y las condiciones de drenaje, resultan en una menor concentración de minerales magnéticos en el solum. La técnica resultaría de interés para la cartografía semidetallada en la provincia, ya que podría diferenciar los órdenes de suelos rojos y brindaría elementos necesarios para la interpretación de las condiciones de drenaje, generando un volumen importante de información y reduciendo el número de análisis de laboratorio.

**PALABRAS CLAVE:** susceptibilidad magnética, cartografía, Misiones

### INTRODUCCIÓN

Los óxidos de hierro presentes en los suelos pueden ser utilizados como indicadores de procesos pedogenéticos, reflejando su ambiente de formación (Mullins 1977; Maher 1986; Thompson & Oldfield, 1986). Estos pueden sufrir también transformaciones en horizontes superficiales, en función de las condiciones químicas y físico-hídricas introducidas por el manejo (Morrás *et al.*, 1998; Morrás, 2018). Por otro lado, estos componentes influyen en propiedades y funciones tales como el color, la agregación, la capacidad de intercambio de cationes, la retención de fósforo y la nutrición vegetal, entre otras (Bautista *et al.*, 2014).

De acuerdo con el ambiente edáfico, la oxidación del hierro libre puede formar minerales ferrimagnéticos, como la magnetita y la maghemita, o antiferromagnéticos como la hematita y la goethita. Los primeros muestran propiedades magnéticas más marcadas que los segundos, y éstas dependen tanto de los elementos constitutivos de los minerales, como de su estructura cristalina (Mullins, 1977). Por tal motivo, el estudio de parámetros magnéticos constituye un indicador sensible para la evaluación de las propiedades edáficas.

Dentro de las técnicas más utilizadas y de bajo costo, la susceptibilidad magnética (SM) provee información que depende del tipo, abundancia y tamaño de grano de los minerales magnéticos presentes en los suelos, los cuales provienen tanto del material de origen como

Organizado por:

1386



de procesos de neogénesis condicionados por el ambiente (Mullins, 1977). En Argentina se ha aplicado principalmente para el estudio de la génesis y evolución paleoambiental en suelos actuales y secuencias de loess-paleosuelos (e.g. Nabel *et al.*, 1999; Orgeira *et al.*, 2008; Bartel, 2009; Liu *et al.*, 2010; Gómez Samus *et al.*, 2016), pero también para evaluar la relación con parámetros hídricos (e.g. Morrás *et al.*, 2004) y para estudiar el efecto en el suelo de incendios forestales (e.g. Minervini *et al.*, 2018). Dado que la SM puede relacionarse con parámetros morfológicos, físicos y químicos, el objetivo de este trabajo es evaluar su utilización como complemento al estudio de los procesos pedogenéticos en los suelos dominantes de Misiones, así como su potencial aplicación en cartografía.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área en estudio

En el contexto de la pedodiversidad de nuestro país, los suelos rojos de Misiones pueden ser considerados como “suelos magnéticos”, en relación con la abundancia de minerales magnéticos presentes en sus diferentes fracciones granulométricas. Este grupo incluye a los suelos de mayor grado de evolución, desarrollados a partir de la profunda alteración de la roca basáltica de la Formación Serra Geral (Riggi & Riggi, 1964; Sanesi, 1965; Morrás *et al.*, 2009). Desde el punto de vista cartográfico, dominan los Ultisoles, Alfisoles y en menor medida Oxisoles (INTA-SAGyP, 1990; Moretti & Navarro de Rau, 2019). Se desarrollan principalmente en las regiones geomorfológicas de la meseta central preservada (divisoria de aguas de la cuenca de los ríos Paraná y Uruguay) y del pediplano parcialmente disectado con y sin vegetación arbórea, franja extendida a lo largo del valle de los ríos Paraná e Iguazú (INTA-SAGyP, 1990). Estudios realizados en Ultisoles de la meseta reflejaron elevados valores de SM, los cuales se incrementan progresivamente desde el saprolito a la superficie, hecho que se atribuye a la mayor concentración de magnetita en ese sentido (Morrás *et al.*, 2009). Este mineral, muy resistente a la meteorización, es común en el material parental basáltico y se acumula en las fracciones gruesas de los suelos (Mijovilovich *et al.*, 1998; Causevic *et al.*, 2004).

Le siguen en orden de importancia, cubriendo una superficie considerable del territorio provincial, los suelos denominados “pedregosos”. Dominan la unidad geomorfológica del relieve montañoso fuertemente disectado y otras unidades similares, caracterizadas por fuertes pendientes y la prevalencia de procesos de erosión. Este grupo incluye tanto a los afloramientos rocosos como a los Molisoles poco evolucionados, Alfisoles, Entisoles e Inceptisoles (INTA-SAGyP, 1990; Moretti & Navarro de Rau, 2019). Para estos suelos aún no se cuenta con información detallada de su mineralogía magnética, aunque se presume que la concentración de oxi-hidróxidos es menor que en el grupo anterior. En este sentido, los valores de SM reportados por Morrás *et al.* (2009) para un Alfisol desarrollado en una depresión de la meseta central misionera son notoriamente bajos, en probable relación con la destrucción de minerales ferrimagnéticos en un ambiente reductor. No obstante, se observó un claro incremento de la SM en la superficie, vinculado a la acumulación coluvial de material proveniente de los suelos rojos circunvecinos, indicando una discontinuidad litológica.

### Tareas de campo y análisis de laboratorio

Se estudian tres perfiles de suelo en el departamento de Leandro N. Alem, Misiones (figura 1). Dos de ellos se incluyen dentro de los “suelos rojos” (Ultisol y Alfisol) y otro corresponde al grupo de los “suelos pedregosos” (Molisol). El Ultisol (27°35'9"S; 55°15'16"O) se halla expuesto en un corte de la Ruta nacional 14 dentro de la meseta central preservada, en posición de media loma alta. El Alfisol (27°39'2.8"S; 55°25'43.3"O) y el Molisol (27°39'20.75"S; 55°26'23.95"O) fueron estudiados en calicatas, ubicadas en el predio de la EEA Cerro Azul del INTA. Se encuentran en posición de media loma y media loma baja respectivamente, en un sector de transición entre las regiones geomorfológicas de las estribaciones de la meseta central preservada y del relieve fuertemente ondulado a colinado.

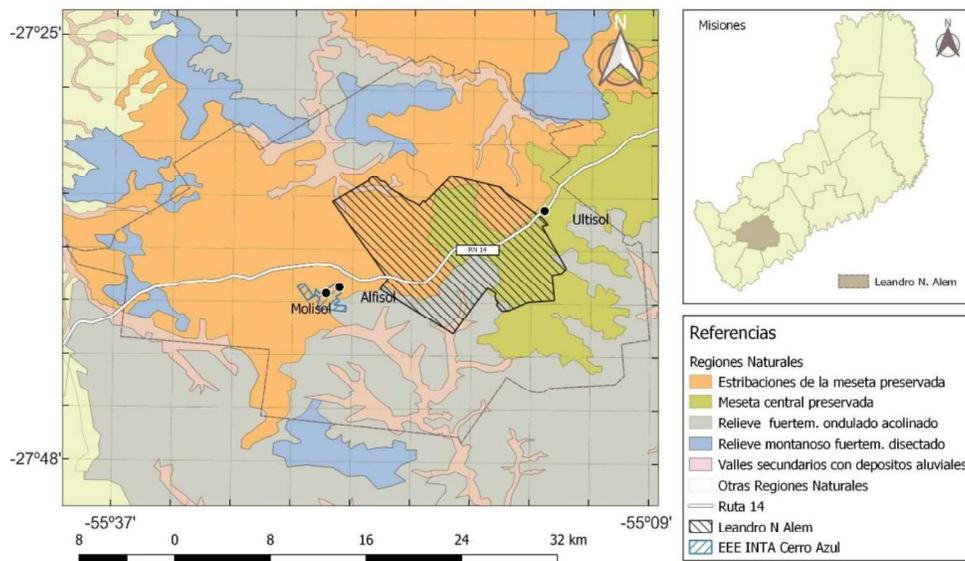


Figura 1. Ubicación de los perfiles estudiados

De acuerdo con la Carta de Suelos a escala 1:50.000 del departamento de Leandro N. Alem (Godagnone & de la Fuente, 2013), el Ultisol corresponde a la Serie Naranjal (Kandiudult típico), en tanto que para el Alfisol y Molisol se requiere mayor información analítica para relacionar con la Serie.

De cada perfil se realizó la descripción morfológica, de la que se presenta una síntesis que comprende el color Munsell en seco, estructura (tipo/clase/grado) y textura a campo. Por otra parte se extrajeron muestras a intervalos regulares (cada 20 cm de profundidad para el Ultisol y cada 10 cm para el Alfisol y el Molisol). La susceptibilidad magnética en masa ( $\chi$ ), se determinó utilizando un equipo Bartington MS2 con un sensor MS2B. Las muestras se midieron en masa específica ( $m^3.kg^{-1}$ ) a baja frecuencia (0,465 kHz).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Ultisol es un suelo muy profundo y desarrollado, de textura fina (tabla 1 y figura 2). Por debajo del horizonte Ap se reconoció una sucesión de horizontes iluviales, aquí simplificados en un solo horizonte Bt. Alrededor de los 6 metros de profundidad se presenta un horizonte de nódulos ferruginosos (H.N.F.), llamado genéricamente “línea de piedras” en la literatura. Detalles acerca de la génesis e implicancias de estos horizontes en Misiones pueden consultarse en Moretti & Morrás (2018). El perfil pasa gradualmente al saprolito basáltico (Cr) con una serie de horizontes transicionales, también aquí agrupados en un solo horizonte BC. El saprolito es blando (se puede cortar con cuchillo) y se presenta masivo.

El Alfisol también es un suelo profundo, desarrollado y de textura fina, aunque a diferencia del anterior, el solum apenas supera el metro de profundidad. Los horizontes transicionales incluyen fragmentos aislados de basalto alterado, que pasan en profundidad -a través de un límite abrupto- a la roca basáltica saprolitizada (2Cr). Esta última presenta grietas y es de consistencia dura a muy dura.

El Molisol es un suelo somero, de moderado desarrollo y de textura media a fina. El perfil tiene una potencia de 46 cm, profundidad a la que se reconoce -luego de un límite abrupto- la roca basáltica saprolitizada (2Cr). La roca es de consistencia dura a muy dura, presenta escasos moteados de hierro en el contacto con el horizonte BC y abundantes grietas penetradas por raíces, parcialmente edafizadas.

Tabla 1. Descripción morfológica sintética de los perfiles estudiados.

| Perfil         | Hz     | (cm)    | Color     | Estructura          | Textura               |
|----------------|--------|---------|-----------|---------------------|-----------------------|
| <b>Ultisol</b> | Ap     | 0-20    | 2.5YR 3/4 | B.A./med./mod.      | Arcillosa             |
|                | Bt     | 20-490  | 10R 3/6   | Pr./gr./mod.        | Arcillosa             |
|                | Bw     | 490-590 | 10R 4/6   | B.A./med./mod.      | Arcillosa             |
|                | H.N.F. | 490-610 | 10R 4/8   | B.A./f/mod.-ftes.   | Arcillosa             |
|                | BC     | 610-810 | 10R 4/8   | B.A./med./mod.      | Arcillosa             |
|                | Cr     | 810+    | -         | Masiva              | -                     |
| <b>Alfisol</b> | Ap     | 0-16    | 2.5YR 4/4 | B.A./med./mod-ftes. | Arcillosa             |
|                | Bt1    | 16-42   | 2.5YR 3/6 | Pr./med./mod.       | Arcillosa             |
|                | Bt2    | 42-64   | 2.5YR 3/6 | Pr./med./déb.       | Arcillosa             |
|                | BC1    | 64-90   | 2.5YR 3/6 | B.A./gr./mod.       | Arcillosa             |
|                | BC2    | 90-115  | 2.5YR 3/6 | B.A./gr./déb.       | Arcillosa             |
|                | 2Cr    | 115+    | -         | Masiva              | -                     |
| <b>Molisol</b> | Ap     | 0-13    | 5YR 3/4   | B.A./med./mod.      | Franco arcillo limosa |
|                | Bt     | 13-33   | 5YR 4/4   | B.A./gr./mod.-ftes. | Franco arcillosa      |
|                | BC     | 33-46   | 5YR 4/4   | B.A./gr./mod.       | Franco arcillo limosa |
|                | 2Cr    | 46+     | -         | Masiva              | -                     |

Referencias: H.N.F.: horizonte de nódulos ferruginosos; B.A: bloques angulares; Pr.: prismas; gr.: gruesos; med.: medios; f.: finos; ftes.: fuertes; mod.: moderados; déb.: débiles.

Las curvas de SM muestran una tendencia similar para los suelos rojos, con valores que disminuyen gradualmente desde la superficie al saprolito basáltico, en tanto que para el suelo pedregoso, la SM se mantiene relativamente constante en el solum y aumenta abruptamente en el saprolito (figura 2). Por otro lado, los valores absolutos son diferentes en cada perfil: El Ultisol presenta valores cercanos a  $27 \times 10^{-6} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$  en superficie y luego una gradual disminución en profundidad, incrementando ligeramente en el saprolito basáltico (Cr). El Alfisol muestra valores máximos en superficie de  $17 \times 10^{-6} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ , los que disminuyen gradualmente en profundidad, incrementan ligeramente en el horizonte Bt2, y finalmente se mantienen constantes en el horizonte de transición BC1, con valores comprendidos entre  $8$  y  $9 \times 10^{-6} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ . En el Molisol la SM es de  $9 \times 10^{-6} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$  a nivel superficial, luego se mantiene constante en el horizonte Bt ( $\sim 7,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ ), disminuye ligeramente en el BC y registra un marcado incremento en el saprolito (2Cr), con valores por encima de los  $17 \times 10^{-6} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ .

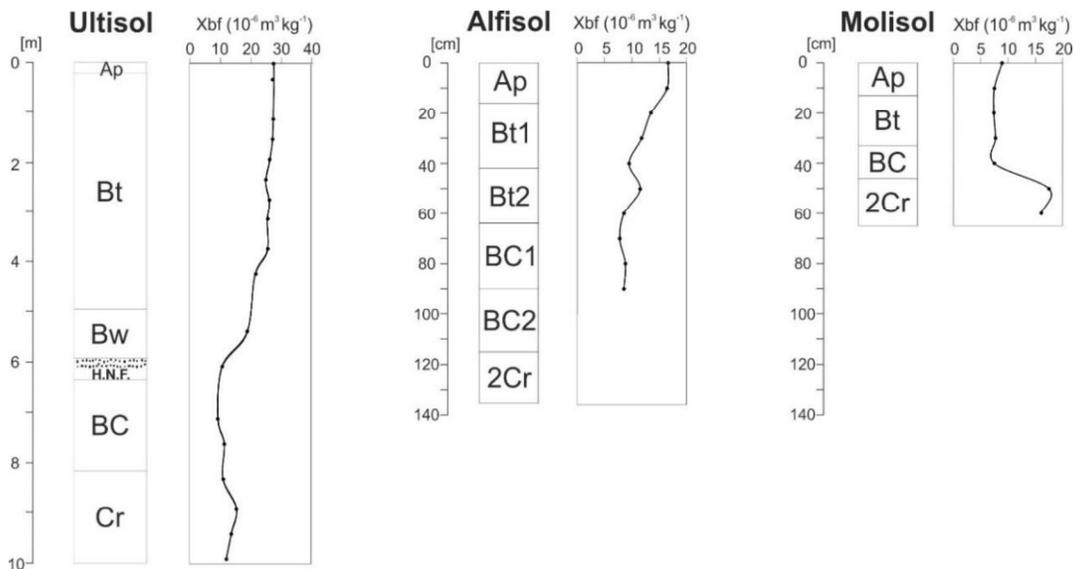


Figura 2. Valores de SM en masa para los tres perfiles estudiados.

La tendencia observada en los suelos rojos se corresponde con la reportada por Morrás *et al.* (2009) para Ultisoles de Misiones y estaría relacionada con la creciente concentración de magnetita -heredada del material parental basáltico- hacia la superficie. Por otra parte, la posición elevada en el paisaje y las buenas condiciones de drenaje prevalecientes en estos perfiles favorecen la precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro, incrementando la señal magnética en ese sentido. En el caso particular del Alfisol, el incremento puntual de la SM en el horizonte Bt2 podría deberse a la presencia de magnetita pedogenética acumulada por iluviación y/o neoformada a esa profundidad. Mediciones de SM a doble frecuencia realizadas en suelos rojos de Misiones, detectaron la presencia de muy pequeñas partículas superparamagnéticas en sus horizontes iluviales (Morrás *et al.*, 2009).

En cuanto a los valores absolutos de SM, el Ultisol prácticamente duplica al Alfisol, indicando una mayor proporción de minerales magnéticos en el primero, en relación con su mayor grado de evolución.

A diferencia de los anteriores, la curva de SM en el Molisol indica que los minerales ferrimagnéticos están menos concentrados en el solum respecto al material parental. En este caso y al tratarse de un suelo más joven, es esperable una menor concentración de minerales magnéticos heredados en la fracción gruesa y una menor proporción de minerales neoformados en la fracción fina. Por el contrario, la posición relativamente baja en el paisaje y la presencia de la roca saprolitizada a los 48 cm de profundidad, condicionan el drenaje promoviendo un ambiente reductor, con la consecuente destrucción de minerales magnéticos. A nivel superficial se registra el valor máximo medido en el solum, hecho atribuible a las condiciones más oxidantes ocurridas en la interface suelo-atmósfera. Por el contrario, en el contacto con la roca se observa una pequeña disminución en la SM que podría vincularse a la fluctuación del nivel freático, lo que se relaciona con la presencia de moteados a esa profundidad.

## CONCLUSIONES

El estudio de la susceptibilidad magnética en suelos representativos de la provincia de Misiones permitió en primera instancia distinguir entre suelos rojos y pedregosos, en función de las tendencias de los valores en profundidad. Disminuciones o aumentos de la SM a lo largo del perfil pudieron relacionarse con las condiciones de óxido-reducción que afectan a esos suelos. Por otra parte, los valores absolutos de SM reflejarían el grado de evolución del perfil. De esta manera, además de las implicancias en la génesis de suelos, la técnica puede ser de utilidad para la cartografía semidetallada en la provincia. Debido a la gran cantidad de observaciones que requiere la escala, la medición de la SM podría complementar los estudios morfológicos ayudando a diferenciar los órdenes de suelos rojos (Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles), generando un volumen importante de información y reduciendo el número de análisis de laboratorio. Por otro lado, brindaría elementos necesarios para la interpretación de las condiciones de drenaje, aspectos requeridos para la clasificación taxonómica de los perfiles.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bartel, AA, 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. Bahía Blanca, Argentina.
- Bautista F, R Cejudo-Ruiz, B Aguilar-Reyes & A Gogichaishvili, 2014. El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión. Bol. Soc. Geol. Mex., 66:365-376.
- Causevic H, HJM Morrás, A Mijovilovich & C Saragovi. 2004. Evidences of the stability of magnetite on a soil from Northeastern Argentina by Mössbauer spectroscopy and magnetization measurements. Physica B Condens. Matter, 354(1-4):373-376.
- Godagnone RE & JC De la Fuente, 2013. Inventario del recurso suelo del departamento Leandro N. Alem, Provincia de Misiones. INTA Buenos Aires, Argentina. 159 p.

- Gómez Samus, ML, Y Rico & JC Bidegain. 2016. Señal magnética en suelos del centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Lat. Am. J. Sedimentol. Basin. Anal.*, 23(2):93-110.
- INTA-SAGyP, 1990. Atlas de suelos de la República Argentina. Provincia de Misiones, Vol. II, pp. 107-154.
- Liu Q, J Torrent, HJM Morrás, A Hong, Z Jiang & Y Su, 2010. Superparamagnetism of two modern soils from the northeastern Pampean region, Argentina and its paleoclimatic indications. *Geophys. J. Int.*, 183(2):695-705.
- Maher BA, 1986. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Phys. Earth. Planet. Int.*, 42:76-92.
- Mijovilovich A, HJM Morrás, C Saragovi, G Santana & J Fabris, 1998. Magnetic fraction of an Ultisol from Misiones, Argentina. *Hyperfine Interact.*, 3:332-335.
- Minervini MG, HJM Morrás & MA Taboada, 2018. Efectos del fuego en la matriz del suelo: consecuencias sobre las propiedades físicas y mineralógicas. *Ecología Austral*, 28:12-27.
- Moretti LM & HJM Morrás, 2018. Líneas de piedra en suelos del noreste argentino. Origen e implicancias. En: *Compactaciones naturales y antrópicas en suelos argentinos*. Ed. C Álvarez & P Imbellone. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Libro digital, 574 p.
- Moretti LM & MF Navarro de Rau, 2019. Soils of Misiones. En: *The Soils of Argentina*. Ed G Rubio, R Lavado & F Pereyra. *World Soils Book Series*. Ed Springer, 268 p.
- Morrás HJM, 2018. Dinámica estructural de un Ultisol con distintos manejos del cultivo de la Yerba Mate, Misiones. En: *Compactaciones naturales y antrópicas de suelos argentinos*. Ed. C Álvarez & P Imbellone. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Libro digital, 574 p.
- Morrás HJM, A Mijovilovich, E Leiva & C Saragovi, 1998. Modifications of iron mineralogy induced by management practices in an Ultisol from Misiones, Argentina. *Proceedings XVI World Congress of Soil Science, Montpellier, France*. Publicación en CD.
- Morrás HJM, G Ciari, C Grasticini, G Cruzate, MV Altinier & M Castiglioni, 2004. Variación espacial y relación entre la retención de humedad y la mineralogía magnética en suelos del sur de la Pampa Ondulada. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná*, (editado en CD).
- Morrás HJM, LM Moretti, G Píccolo & W Zech, 2009. Genesis of subtropical soils with stony horizons in NE Argentina: Autochthony and polygenesis. *Quatern. Int.*, 196:137-159.
- Mullins CE. 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil Science- A review. *Journal of Soil Science* 28(2):223-246.
- Nabel PE, HJM Morrás, G Petersen & W Zech, 1999. Correlation of magnetic and lithologic features of soils and Quaternary sediments from the Undulating Pampa. *J. S. Am. Earth Sci.*, 12(3):311-323.
- Orgeira MJ, FX Pereyra, C Vásquez, E Castañeda & R Compagnucci, 2008. Environmental magnetism in present soils, Buenos Aires province, Argentina. *J. S. Am. Earth Sci.*, 26:217-224.
- Riggi J & N Riggi, 1964. Meteorización de basaltos en Misiones. *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, 19(1):57-70.
- Sanesi G, 1965. I suoli di Misiones. *Accademia Italiana di Scienze Forestali*, 343 p.
- Thompson R & F Oldfield, 1986, *Environmental Magnetism*. Londres, Allen and Unwin, 227 p.