



## PROPIEDADES MAGNÉTICAS Y PEDOGÉNESIS EN UN PERFIL DE SUELO CON HORIZONTES CONTRASTANTES

Francisco Bautista<sup>1\*</sup>, Rubén Cejudo<sup>1</sup>, Antonio Sánchez<sup>2</sup>, Bertha Aguilar<sup>3</sup>, M<sup>a</sup> José Delgado<sup>2</sup>, Avto Goguitchaichvili<sup>4</sup>, Purificación Marín<sup>2</sup>, Juana María Gil<sup>5</sup>, y Elvira Díaz-Pereira<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental (LUGA), Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. \*[leptosol@ciga.unam.mx](mailto:leptosol@ciga.unam.mx), [leptosol@yahoo.com](mailto:leptosol@yahoo.com)

<sup>2</sup> Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología. Facultad de Química, Universidad de Murcia. España.

<sup>3</sup> Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, LUGA, Instituto de Geofísica, Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México. Michoacán, México.

<sup>4</sup> Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental (LUGA), Instituto de Geofísica, Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México. Michoacán, México y Laboratorio de Paleomagnetismo, Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, España.

<sup>5</sup> Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC), Departamento de Conservación de Suelos y Agua y Manejo de Residuos Orgánicos. Campus Universitario de Espinardo. Espinardo (Murcia). España.

### RESUMEN

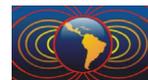
El objetivo principal de este estudio fue analizar y relacionar las propiedades magnéticas de un suelo Kastanozem con los resultados de las técnicas convencionales en cuanto a la identificación de los horizontes de diagnóstico y procesos edáficos. Se realizaron regresiones lineales simples utilizando las propiedades magnéticas como variables independientes y las propiedades convencionales como variables dependientes. Las partículas de diámetro entre 20-50, 50-100 y 100-250  $\mu\text{m}$  presentaron correlaciones significativas con las propiedades magnéticas, como  $S_{-200}$ , MRIS y  $\text{MRIS } \chi^{-1}$ . En el horizonte mólico se encontraron los valores más altos de la susceptibilidad magnética. En un horizonte árgico, los valores más elevados de susceptibilidad dependiente de la frecuencia, en los horizontes Bt. Un horizonte cálcico es caracterizado por la disminución de los valores en la susceptibilidad magnética másica y magnetización remanente isotérmica, en los horizontes Ck. Se identificó una discontinuidad textural entre los horizontes A2 y Bt, constatada por el aumento de la susceptibilidad dependiente de la frecuencia en el horizonte 2BtA. Las propiedades magnéticas del suelo revelaron que la magnetita es pedogenética y que se produce en el horizonte A. Los portadores magnéticos en los horizontes Bt son más pequeños y se relacionan con el alto porcentaje de arcilla.

**Palabras claves:** Kastanozem, susceptibilidad magnética, magnetización remanente, correlaciones, partículas.

### ABSTRACT

The aim of this work was to analyze and correlate the magnetic properties of a Kastanozem soil to the identification of diagnostic horizons and soil processes by conventional techniques. Simple linear regressions were performed using the magnetic properties as independent variables and conventional properties as dependent variables. The particles of diameter between 20-50, 50-100 and 100-250  $\mu\text{m}$  showed significant correlations with the magnetic properties, such as  $S_{-200}$  and MRIS and  $\text{MRIS } \chi^{-1}$ . In the mollic horizon were the higher values of magnetic susceptibility. In an argic horizon was recorded the higher values of frequency dependent susceptibility, in the Bt horizons. A calcic horizon showed decreasing values of the mass magnetic susceptibility and isothermal remanent magnetization, in Ck horizons. A textural discontinuity was identified between A2 and Bt horizons found by the increased values of frequency dependent susceptibility in the 2BtA horizon. The magnetic properties of the soil revealed that magnetite is pedogenetic and it is produced in the A horizon. Magnetic carriers in Bt horizons are smaller and are related to the high percentage of clay.

**Keywords:** Kastanozem, magnetic susceptibility, remanent magnetization, correlations, particles.



## Introducción

La susceptibilidad magnética volumétrica ( $\kappa$ ) y másica ( $\chi = \kappa_{\text{if}} \rho^{-1}$ , donde  $\rho$  es la densidad y  $\kappa_{\text{if}}$  susceptibilidad magnética medida a baja frecuencia) se han empleado en la caracterización de los suelos desde la década de los setenta. La proporción de partículas superparamagnéticas (SP) de tamaños  $< 0.03 \mu\text{m}$  puede obtenerse por medio del parámetro de la susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia ( $\chi_{\text{dif}}\%$ ) en suelos (Barton, McElhinny, 1981).

En Gleysols y otros suelos con drenaje deficiente es bien conocido que los óxidos de hierro se solubilizan y se translocan entre los horizontes, lo cual puede registrarse perfectamente con la susceptibilidad magnética (Jordanova *et al.*, 2011); sin embargo, los estudios disponibles de caracterización, génesis y clasificación de suelos que emplean otros parámetros magnéticos son escasos (Solleiro *et al.*, 2011). Entre los suelos mejor caracterizados con esta metodología destacan: Histosol, Leptosol, Cambisol, Andosol, Chernozem, Phaeozem y Luvisol (Soubrand-Colin *et al.*, 2009; Jordanova *et al.*, 2010).

Cabe mencionar que otras técnicas de análisis de las propiedades magnéticas (PM) han sido poco utilizadas, como la adquisición de magnetización remanente isotérmica (MRI) que permite estimar la concentración relativa de partículas ferrimagnéticas; la magnetización remanente anhistérmica (MRA) de utilidad para estimar la concentración y tamaño de partícula ferrimagnética, así como las curvas termomagnéticas mediante las cuales se identifican los minerales magnéticos; todo esto ayudaría a lograr un mejor entendimiento de los procesos pedogenéticos (Bartel *et al.*, 2005; Rivas *et al.*, 2011; Jordanova *et al.*, 2010).

En Murcia, España, se encuentra un Kastanozem que contiene una secuencia de horizontes contrastante en materia orgánica, textura, óxidos de hierro y carbonatos que lo hacen atractivo para probar su caracterización magnética y dilucidar si las PM presentan relación con las propiedades del suelo medidas con las técnicas convencionales para definir su utilidad como metodología complementaria.

El objetivo de este estudio fue utilizar las propiedades magnéticas y edafológicas convencionales para caracterizar un Kastanozem con horizontes contrastantes.

## Metodología

El suelo estudiado se encuentra situado en el Campo de Cartagena, Murcia, SE de España ( $37^{\circ} 44' 32.23''$  N -  $1^{\circ} 07' 50.65''$  W), en una llanura con una ligera inclinación hacia el Mar Menor.

Se tomaron muestras de suelo de cada uno de los seis horizontes identificados (A1-A2-2BtA-Bt-BtCk-Ck); las muestras fueron secadas a temperatura ambiente y tamizadas a 2 mm. Se realizó la descripción macromorfológica de los horizontes.

Se realizaron los siguientes análisis: color, textura, carbonato cálcico equivalente o total, pH; salinidad del suelo; carbono orgánico; nitrógeno total; capacidad de intercambio catiónico, hierro libre ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )<sub>d</sub> y el hierro total ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )<sub>t</sub>. Se estimó la mineralogía de la fracción de arcilla por difracción de rayos x (DRX) en polvo y en agregado orientado. La fracción pesada de la arena fina y muy fina (50-250  $\mu\text{m}$ ) se observó por microscopía de polarización.

Se midió la  $\kappa$  a dos frecuencias (470 y 4700 kHz); se realizaron curvas de susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura (curvas  $\kappa$ -T); las curvas de MRI; se calcularon:  $\chi$ , cocientes  $S_{-200}$ ,  $S_{-25}$  y SIRM  $\chi^{-1}$ . Se realizaron regresiones simples, utilizando los parámetros magnéticos ( $\chi$ ,  $\chi_{\text{fd}}\%$ , MRIS,  $S_{-200}$ ,  $S_{-25}$  y MRIS  $\chi^{-1}$ ) como variables independientes y las propiedades convencionales de los suelos (pH,  $\text{CaCO}_3$ , CE, CO, CIC,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ <sub>t</sub>,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ <sub>d</sub>, la relación  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ <sub>d</sub> /  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ <sub>t</sub> y porcentaje de arcilla y arena) como variables dependientes con el fin de encontrar el grado de asociación entre ellas.



## Resultados

En los horizontes A1 y A2 predominan los minerales ferrimagnéticos (MFM) de menor coercitividad que en el resto de los horizontes ya que  $S_{-200}$  y MRIS  $\chi^1$  son mayores, probablemente se trata de minerales de la serie de la Ti-magnetita con menor grado de sustitución de Fe por Ti (fig. 1).

En el horizonte 2BtA hay una disminución en la concentración de los MFM con respecto al horizonte A2, de acuerdo a los valores tanto de la  $\chi$  como de la MRIS, y se presenta un incremento en el contenido de partículas finas o SP con relación a los horizontes A1 y A2. El factor de MRIS  $\chi^1$  tiende a disminuir indicando una reducción en la concentración de los MFM.

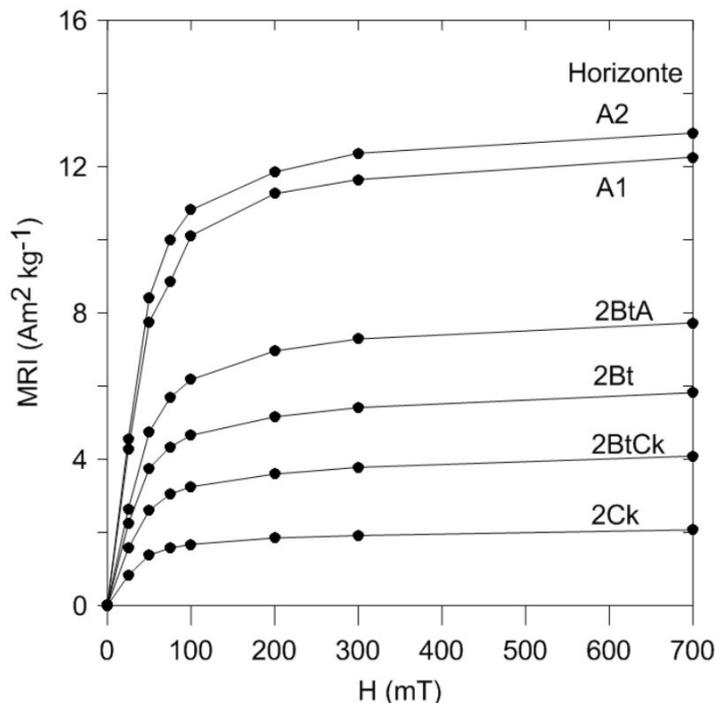


Figura 1. Curvas termomagnéticas.

En el horizonte Bt se presenta un ligero incremento en la  $\chi$ , en comparación con el horizonte 2BtA, debido a la mayor proporción de partículas SP. Esto no indica mayor proporción de MFM ya que la MRIS disminuye. El parámetro  $S_{-200}$  indica la predominancia de MFM.

En el horizonte BtCk se registra una disminución de la concentración de minerales magnéticos que en el horizonte Bt. Se encuentran MFM como magnetita pero su concentración es baja. Se registra una proporción de partículas SP muy similar a la registrada en el horizonte 2BtA. Hay predominancia de MFM.

En el horizonte Ck hay una disminución en la concentración de minerales magnéticos comparada con los demás horizontes. La concentración de MFM es la más baja de todo el perfil, de acuerdo a los valores de la  $\chi$  y de la MRIS. El valor de  $\chi_{df}^{\%}$  indica la predominancia de partículas SP en la fracción magnética. El índice  $S_{-200}$  muestra la predominancia de minerales MFM aunque con la concentración más baja del perfil, según lo indica el parámetro MRIS  $\chi^1$ .

Los horizontes A muestran MFM en proporciones, cantidades y tamaños de partícula similares.

En el horizonte 2BtA se presenta una disminución del valor  $\chi$ , pero un aumento en cuanto a la presencia de partículas SP (Dearing 1999). El indicador  $S_{-200}$  muestra una disminución de MFM en la muestra sobre los antiferromagnéticos. El factor de MRIS  $\chi^1$  tiende a disminuir indicando una reducción de material ferrimagnético con respecto a los horizontes A.

El horizonte Bt registra un ligero incremento del valor de  $\chi$  con respecto a BtA, una disminución de la proporción de MFM con respecto a los MAFM y un aumento en la proporción de partículas SP, esto último concuerda con la designación del horizonte Bt.



Los horizontes Bt y BtCk muestran valores poco comunes para el parámetro  $\chi_{\text{df}}\%$  ( $>14$ ) ya que en Entisoles y Molisoles se han reportan valores menores a seis (Bartel *et al.*, 2011), esta situación puede explicarse por la intensidad del proceso de acumulación de partículas de arcilla en Bt. El horizonte Ck muestra las menores concentraciones de minerales magnéticos y es el horizonte con propiedades más cercanas a la roca.

Los valores de MRIS y  $\chi$  muestran variaciones claras en cuanto a las concentraciones magnéticas para cada horizonte con respecto al principal portador magnético. La concentración de MFM varía con respecto de la profundidad, la mayor concentración se localiza en los horizontes superficiales A1 y A2, mientras que el menor valor se presenta en el horizonte Ck.

En el horizonte A2 existe una concentración ligeramente mayor de MFM que en A1. El horizonte Bt se desvía más de la linealidad ya que tiene un aumento en la  $\chi$  (debido a la mayor proporción de partículas SP) que no aumenta directamente con la MRIS. Esto no debe interpretarse como un aumento en la concentración de MFM. Se confirma la predominancia de MFM en todos los horizontes del suelo, lo cual se deduce del cociente  $S_{-200}$ , ya que sus valores están entre 0.8 y 0.9 (Evans, Heller, 2003). Así mismo, es posible identificar un patrón de distribución de la concentración de minerales magnéticos a lo largo del perfil. La concentración de MFM disminuye con respecto de la profundidad, existen algunas pequeñas variaciones de intensidad en cada horizonte, que probablemente se deben a procesos eluviación/iluviación.

Las curvas magnéticas de calentamiento de los horizontes A1 y A2 muestran dos fases magnéticas. El primer punto de inflexión se tiene entre 300 y 330°C (fig. 1), mientras que el segundo se presenta entre 500 y 550°C. Podría tratarse de una mezcla de fases de la Ti-magnetita y Ti-maghemita (Roberts *et al.*, 2011) En la curva K-T del horizonte A2 se aprecia una débil inflexión después de los 600° C que podría atribuirse a la hematita.

Las curvas termomagnéticas del horizonte A1 y A2 muestran un comportamiento irreversible. Esto sugiere cambios en la mineralogía magnética producida por el calentamiento (formación de minerales de la serie de las titanomagnetitas o titanomaghemitas). Las curvas de enfriamiento muestran un comportamiento muy similar ya que se sitúan por arriba de la curva de calentamiento. Este aumento magnético se debe probablemente a la formación de la magnetita durante los experimentos de laboratorio.

Las curvas de enfriamiento y calentamiento del horizonte 2BtA son cuasi-reversibles. La curva de enfriamiento se encuentra ligeramente situada por arriba de la curva de calentamiento manteniendo una forma muy similar que la curva de calentamiento, esto sugiere que los cambios en la mineralogía son pequeños. La curva de calentamiento muestra un incremento de la señal magnética hasta antes de los 350° C, esto probablemente se debe al reacomodo de los momentos magnéticos de la magnetita/maghemita presentes en estado meta estable. Posteriormente se observa un decaimiento que finaliza más allá de los 630° C, lo cual indica que además de las fases ya mencionadas, también se tenga la presencia de hematita y goethita.

Para el horizonte Bt se observa un primer decaimiento de la curva de calentamiento entre 200 y 300° C; un segundo decaimiento alrededor de los 430° C y un tercero muy débil arriba de los 600° C. La mezcla de fases probablemente sea de Ti-magnetita/Ti-maghemita con poca hematita/goetita. Esta muestra también genera Ti-magnetita en el calentamiento en laboratorio, por ello el aumento magnético en la curva de enfriamiento.

Las curvas termomagnéticas del horizonte BtCk presentan un comportamiento irreversible; la intensidad de la señal para este horizonte es menor comparado con los demás horizontes. Se observa que la señal magnética decae a cero progresivamente después de la fase entre 150° C y 200° C. Este comportamiento lo presentan Ti-magnetitas con alto contenido en Ti.

La curva termomagnética del horizonte Ck muestra dos decaimientos parecidos a los de la muestra Bt, por lo que se tiene una mineralogía magnética similar pero en menor concentración.

Las curvas de MRI también concuerdan con la profundidad del perfil, menores intensidades de MRI y menores proporciones de titanomagnetita/titanomaghemitas en el horizonte C más cercano a la roca madre; y por el contrario, un aumento en los horizontes pedogenéticos B y A.



Los horizontes que presentan valores por arriba de 10 para  $\chi_{df}^{\%}$ , sugiere que hay procesos bioquímicos en la formación de los MFM tal y como también ha sido reportado para otros Kastanozems (Alekseeva *et al.*, 2007). La concentración y tamaño de los MFM es mayor en los horizontes superiores (A1 y A2) en comparación con los de mayor profundidad (2BtA, Bt, BtCk y Ck), lo cual se soporta con el aumento del 163% a 185% de la  $\chi$  y del 119% a 118% de MRIS  $\chi^{-1}$  con respecto al horizonte C. La MRIS y la  $\chi$  presentaron correlaciones lineales con valores de  $r = 0.81$  y  $r = 0.84$ , respectivamente ( $p < 0.05$ ) con el carbono orgánico, lo cual sugiere que los MFM del horizonte A son de origen pedogenético (Coker *et al.*, 2006) aunado a los bajos porcentajes relativos de arcilla, los altos porcentajes de arena gruesa y los bajos contenidos de carbonatos.

Las partículas de diámetro entre 20-50, 50-100 y 100-250  $\mu\text{m}$ , presentaron correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ) con las propiedades magnéticas, como  $S_{-200}$ , MRIS y MRIS  $\chi^{-1}$ , el comportamiento de las variables es de valores descendentes con la profundidad del perfil.

La correlación positiva entre el porcentaje de arcilla y la  $\chi_{df}^{\%}$  indica que en los horizontes B (2BtA, Bt, BtCk) se incrementa la cantidad de minerales magnéticos (magnetita y lepidocrocita) de tamaño menor a 0.03  $\mu\text{m}$ .

En los horizontes B hay una disminución de MFM identificada por los valores MRIS  $\chi^{-1}$  y  $S_{-200}$ . En el horizonte Ck la concentración de MFM es la más baja.

Las propiedades magnéticas del suelo a lo largo del perfil tienen relación con la textura, y el carbono orgánico, es posible que en este caso, la relación sea muy clara por las grandes diferencias mineralógicas entre los horizontes superficiales (A1 y A2); los subsuperficiales (2BtA y Bt); y los de mayor profundidad (BtCk y Ck).

En los horizontes más profundos, con altos contenidos de carbonato de calcio, encontramos que los portadores magnéticos son del tipo de la goethita y se encuentran en bajas cantidades.

En resumen, el aporte de este trabajo radica en que los portadores magnéticos son de origen pedogenético fácilmente identificables con la susceptibilidad magnética, MRIS e MRI; la  $\chi_{df}^{\%}$  correlaciona con el porcentaje de arcilla lo cual permite fortalecer la identificación del horizonte Bt; y la identificación de los portadores magnéticos mediante las curvas termomagnéticas y la curva de adquisición de la magnetización remanente isotérmica.

## Conclusiones

Las propiedades magnéticas concordaron con las propiedades físicas, químicas y mineralógicas medidas con las técnicas convencionales ya que permitieron una mejor caracterización de los horizontes de diagnóstico como el árgico por los valores más altos de  $\chi_{df}^{\%}$  en los horizontes Bt; A mólico por los valores mayores de  $\chi$  MRIS y el cociente MRIS  $\chi^{-1}$ ; y cálcico por la disminución de  $\chi$  MRIS y el cociente MRIS  $\chi^{-1}$  en los horizontes Ck. De la misma manera, el aumento de  $\chi_{df}^{\%}$  en el horizonte 2BtA permitió la identificación del cambio textural abrupto.

Además, las propiedades magnéticas permitieron identificar: a) los minerales magnéticos; b) la magnetita como la principal partícula SP presente en el Bt; c) la disminución a profundidad de los MFM; d) la formación en los horizontes A de la Ti-magnetita/Ti maghemita y corroborar la presencia hematita-goethita en pequeña cantidad, lo cual se infiere de las curvas termomagnéticas de los horizontes Bt y probablemente C.

Las propiedades magnéticas de los suelos, en este caso de un Kastanozem, permiten una mejor caracterización del perfil y un mejor entendimiento de los procesos pedogenéticos relacionados con la translocación y formación de los portadores magnéticos.



## Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico a los proyectos “Las propiedades magnéticas de los suelos y sus aplicaciones: contaminación, clasificación, cartografía y uso del fuego en agricultura” (clave CB-2011-01- 169915); y al proyecto CONACYT-153289. También la DGAPA-PAPIIT de la Universidad Nacional Autónoma de México apoyó financieramente el proyecto IN 223110.

## Referencias

- Alekseeva T., Alekseev A., Maher B. A., Demkin V., 2007. Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe, based on mineralogical and magnetic properties of buried palaeosols, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 249, 103-127.
- Bartel A., Bidegain J. C., Sinito A. M., 2005. Propiedades magnéticas de diferentes suelos del partido de La Plata, provincia de Buenos Aires, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60, 591-598.
- Bartel A., Bidegain J. C., Sinito A. M., 2011. Magnetic parameter analysis of a climosequence of soils in the Southern Pampean Region, Argentina, *Geofísica Internacional*, 50 (1), 9-22.
- Barton C. E., McElhinny M., 1981. A 10,000 years geomagnetic secular variation record from three Australian Maars, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 68, 709-724.
- Coker V. S., Patrick R. A. D., van der Laan G., Lloyd J. R., 2006. Formation of Magnetic Minerals by Non-Magnetotactic Prokaryotes, in Schüler, D. (ed.), *Magnetoreception and Magnetosomes in Bacteria*, Berlin, Springer, 275-300.
- Dearing J. A., 1999. Environmental magnetic susceptibility: using the Bartington MS2 system: Oxford, Bartington Instruments, 104 p.
- Evans M. E., Heller F., 2003. Environmental magnetism: Principles and Applications of enviromagnetics, San Diego, Academic Press, 311 p.
- Jordanova D., Jordanova N., Petrov P., Tsacheva T., 2010. Soil development of three Chernozem-like profiles from North Bulgaria revealed by magnetic Studies, *Catena*, 83, 158-169.
- Jordanova N., Jordanova D., Petrov P., 2011. Magnetic imprints of pedogenesis in Planosols and Stagnic Alisol from Bulgaria, *Geoderma*, 160, 477-489.
- Rivas J. F., Ortega B., Solleiro-Rebolledo E., Sedov S., Sánchez S., 2011. Mineralogía magnética de suelos volcánicos en una toposecuencia del valle de Teotihuacán, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64, 1-20.
- Roberts A. P., Chang L., Rowan C. J, Horng C.S., Florindo F., 2011. Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>): An update, *Reviews of Geophysics*, 49, 1-46.
- Solleiro-Rebolledo E., Sycheva S., Sedov S., McClung de Tapia E., Rivera-Uriad Y., Salcido-Berkovich C., Kuznetsova A., 2011. Fluvial processes and paleopedogenesis in the Teotihuacan Valley, México: Responses to late Quaternary environmental changes, *Quaternary International*, 233, 40-52.
- Soubrand-Colin M., Horenb H., Courtin-Nomadea A., 2009. Mineralogical and magnetic characterisation of iron titanium oxides in soils developed on two various basaltic rocks under temperate climate, *Geoderma*, 149, 27-32.