

USO DE LA SEÑAL MAGNÉTICA DE SUELOS Y PALEOSUELOS COMO FUNCIÓN CLIMÁTICA

María Julia ORGEIRA^{1,2}, Rosa H. COMPAGNUCCI^{1,3}

¹ CONICET

² Depto. Ciencias Geológicas FCEN, UBA, INGEODAV. Ciudad Universitaria Pab. II, Nuñez, Buenos Aires. Email: orgeira@gl.fcen.uba.ar

³ Depto. de Ciencias de la Atmósfera FCEN, UBA. Email: rhc@at.fcen.uba.ar

RESUMEN

Se propone la correlación de la señal magnética, registrada en suelos y paleosuelos desarrollados en sedimentos loésicos, con un índice climático (Potencial de almacenamiento de agua, PWS). Los datos analizados sugieren la existencia de umbrales climáticos que afectan la génesis, preservación ó pérdida de minerales ferrimagnéticos. Suelos y paleosuelos con un índice PWS positivo se caracterizan por ambientes que favorece la pérdida de minerales ferrimagnéticos, la que se debe principalmente a procesos de reducción. Estos suelos presentan pérdida de fracción ferrimagnética detrítica como los del NE de la llanura pampeana y SE de China. Por el contrario, PWS negativos previenen condiciones reductoras en el ambiente con lo cual se preservan los minerales ferrimagnéticos detríticos. Por otra parte, las condiciones estacionales de estos suelos permiten la formación de nuevas nanopartículas magnéticas. Estas condiciones producen un neto enriquecimiento en minerales ferrimagnéticos como el observado en suelos de Europa (Rusia, República Checa y Rumania), Asia (paleosuelos del plateau de China) y Norte de África (Túnez). Se discute asimismo, la influencia del material parental en la señal magnética pedogenética.

Palabras clave: *Magnetismo ambiental, Paleoclima, Cenozoico tardío, Paleosuelos.*

ABSTRACT: *The use of the magnetic signal of soils and paleosoils as a climatic function.* The correlation between an index of potential water storage (PWS) with magnetic signal in soils and paleosoils, developed in loessic sediments has been proposed. The analyzed data suggest the existence of climatic thresholds that affect the genesis, preservation or depletion of ferrimagnetic minerals. Soils and paleosoils characterized by a positive PWS have an appropriate environment that favors the depletion of ferrimagnetic minerals due to mainly reductive loss. Such soils are characterized by a depletion of detrital ferrimagnetic minerals, as in northeastern Pampean plain soils and paleosoils of Argentina and SE of China. A negative PWS prevents highly reducing conditions in the soil, and the detrital ferrimagnetic minerals are preserved. On the other hand, the environmental conditions of these soils allow the formation of new nanoparticle minerals. These conditions produce a net magnetic enhancement of the soil, as observed in European soils (Russia, Czech Republic, Rumania), Asian (paleosoils from the loess plateau of China) and Northern African ones (Tunisia). The influence of parent material in the magnetic signal is also discussed.

Keywords: *Magnetism, Paleoclimate, Late Cenozoic, Paleosoils.*

INTRODUCCIÓN

Los estudios de magnetismo de rocas han sido aplicados en secuencias de loess y paleosuelos en diferentes regiones en el análisis de las variaciones climáticas ocurridas durante el Neógeno (Liu *et al.* 1992, Banerjee y Hunt 1993, Maher 1998, Fang *et al.* 1999, Maher y Thompson 1999, Liu *et al.* 2004).

Por otra parte, la doctrina del uniformismo, propuesta por el precursor de la geología moderna James Hutton a fines del siglo XVII, indica que "el presente es la clave para interpretar el pasado". Sobre la base de ello es clara la necesidad de estudios de propiedades magnéticas en suelos

actuales para arribar a una interpretación acabada del significado de la señal magnética de los paleosuelos.

En consecuencia, la interpretación combinada de estudios en suelos actuales y en paleosuelos permitirá la convergencia hacia una teoría única y de aplicación global. La señal magnética de interés en los suelos actuales es la de los horizontes sub-superficiales puesto que éstos son los que generalmente se preservan en paleosuelos y suelos enterrados. El horizonte superior (A) es normalmente total o parcialmente erosionado antes del enterramiento.

En cuanto a la génesis de esta señal magnética durante los procesos pedogenéti-

cos hay más de una hipótesis respecto a ella (Maher y Taylor 1988, Maher 1998, Banerjee 2006, entre otros).

En la presente contribución se asume un origen principalmente inorgánico basado en los procesos de oxido-reducción del Fe con sucesivos estadios estacionales (Orgeira y Compagnucci 2006).

Sin embargo, es indiscutible la acción de bacterias anaeróbicas en los suelos y su capacidad para formar partículas ultrafinas (superparamagnéticas -SP). El problema radica en que capacidad tiene el medio ambiente de garantizar la subsecuente presencia de estas partículas. En consecuencia, el camino orgánico y el inorgánico sobre el origen de la señal mag-

nética no serían antagónicos sino complementarios. Los procesos que ocurren en el suelo son múltiples y complejos. La pregunta es como resulta el balance entre pérdida de partículas magnéticas y génesis, por vía biológicamente inducida o inorgánica, bajo la influencia de distintas condiciones ambientales.

Por otra parte, diferentes contribuciones han propuesto la correlación entre variables climáticas y la señal magnética. Heller *et al.* (1993) estimaron promedios de paleoprecipitación para secuencias de loess-paleosuelos de China. Maher y Thompson (1994), Liu *et al.* (1995) y Han *et al.* (1996) obtuvieron diferentes "climato funciones" correlacionando susceptibilidad magnética con parámetros climáticos para suelos de China. Particularmente, Han *et al.* (1996) sugirieron que una correlación lineal entre la susceptibilidad magnética y la temperatura ó la precipitación no es la mejor para los suelos chinos; un aparente punto de quiebre drástico en sus diagramas está en alrededor de 15° y 1.200 milímetros.

Por su parte, Orgeira y Compagnucci (2006) propusieron un índice potencial de almacenamiento de agua (*potencial water storage*, PWS) determinado en diferentes localidades de Rusia, China y Argentina. Este índice contempla tanto las variables climáticas del sitio individualmente (temperatura y precipitación) como la posición geográfica. La comparación de los resultados magnéticos sugiere la existencia de umbrales. Un primer umbral se encuentra en valores del índice potencial de almacenamiento por arriba de los cuales el ambiente del suelo es estacionalmente reductor. Las condiciones reductoras, combinadas con la presencia de ligantes orgánicos, induce la parcial disolución de minerales ferrimagnéticos. Cuando el índice potencial es negativo, los minerales ferrimagnéticos (detríticos ó pedogénicos) pueden ser preservados en el suelo. De acuerdo con los autores mencionados, por debajo de este umbral existe un neto balance positivo entre generación y disolución de minerales ferrimagnéticos. Orgeira y Compagnucci (2006) coinciden

con Han *et al.* (1996) en que el comportamiento de la señal magnética no tiene una correlación lineal con las variables climáticas. Este comportamiento no lineal determinado cualitativamente, sumado al efecto de la influencia de la natural variabilidad mineralógica del loess, exigen un exhaustivo análisis de la validez global del *magnetic proxy*.

El objetivo de la presente contribución es verificar la validez del índice potencial en suelos actuales de diferentes continentes. Luego, teniendo en cuenta las limitaciones que surjan de este análisis, verificar su aplicación en paleosuelos a nivel global.

LOCALIDADES ANALIZADAS

Para cumplir los objetivos propuestos se analizaron datos magnéticos obtenidos en suelos actuales distribuidos en América del Norte, América del Sur, Europa y Asia, y paleosuelos distribuidos en América del Norte, Europa, N de África y Asia.

Con referencia a los datos de Norte América, se han incluido en el análisis las localidades correspondientes a los estudios de propiedades magnéticas en suelos actuales, llevadas a cabo por Geiss *et al.* (2004), Geiss y Zanner (2006) y Geiss y Zanner (2007). Estos suelos se han desarrollado sobre el *mid-continent United States loess* principalmente sobre la unidad Formación Peoria. Están comprendidos en el extremo centro este de la provincia fisiogeográfica *Great Plain* y principalmente en *Central Lowlys*.

Geiss *et al.* (2004) encontraron un incremento de la señal magnética en el tope de los perfiles de suelo (horizontes Ap y A). Este incremento magnético no se debe a la conversión de minerales de alta coercitividad en ferrimagnéticos, ya que ambos aumentan en concentración hacia el techo del perfil de suelo. Por otra parte, mencionan la adición de loess holocénico Bignell en el tope de la secuencia, y la imposibilidad de distinguir el límite entre ambas unidades.

Geiss y Zanner (2006) sugirieron que el incremento registrado en horizontes su-

periores de suelos puede ser explicado por una pequeña cantidad de minerales ferrimagnéticos (alrededor de menos del 10% en volumen). Afirman que la abundancia de magnetita pedogénica se ajusta en forma grosera con la precipitación. Geiss y Zanner (2007), sobre la base de 75 perfiles de suelo, sugirieron que el enriquecimiento magnético registrado en el horizonte superior, principalmente A y AB, puede ser atribuido a minerales pedogénicos extra finos. Por otra parte, los autores sugirieron que las propiedades magnéticas de estos suelos actuales loésicos reflejan los presentes gradientes de precipitación desde menos de 500 mm/a en SO Nebraska hasta 1000 mm/a en Missouri.

Las localidades sudamericanas analizadas corresponden a aquellas incluidas en los suelos actuales de Orgeira *et al.* (2008) del NE de la provincia de Buenos Aires (localidades de Zárate y Verónica). Se trata de argiudoles desarrollados sobre el loess típico de la Formación Buenos Aires; los de Zárate muestran un enriquecimiento de la señal magnética en tanto los de Verónica depleción de la misma.

Adicionalmente, se incluyó una localidad del sur de la provincia de Buenos Aires (Bartel *et al.* 2006). El material parental sobre el que se desarrolló este perfil es un loess arenoso, posiblemente más joven que la Formación Buenos Aires (loess del Holoceno). Estos sedimentos loésicos yacen sobre un compacto horizonte petrocálcico de edad incierta. El suelo en cuestión fue clasificado como argiudoll típico de un metro de potencia. Los resultados magnéticos obtenidos por los citados autores se restringen a la medición de susceptibilidad magnética total a dos frecuencias. Estos escasos resultados sugieren un progresivo y moderado incremento de la señal magnética desde el horizonte C hacia el A.

En el área europea se han incluido en el análisis los resultados de Maher *et al.* (2003) obtenidos en suelos de la estepa rusa. Los sitios estudiados están distribuidos a lo largo de una transecta SO/NE caracterizada por un gradiente de precipi-

tación anual de los sitios que oscila entre 500 mm/a (Stavropol) a 300 mm/a (Volgograd). Los autores concluyen que la concentración de minerales superparamagnéticos (SP) y domino simple (SD) es mayor en los horizontes A y B que en el material parental homogéneo y poco magnético. Los parámetros magnéticos sistemáticamente aumentan desde la región árida a la más húmeda.

Las localidades de China analizadas corresponden a las presentadas por Han *et al.* (1996). Estos autores midieron e interpretaron el comportamiento magnético de 160 localidades en el área, incluyendo material exclusivamente del horizonte superior (5 a 10 cm desde la superficie). Sus resultados detectan un aumento de la señal de los suelos respecto a la del material parental en la porción norte y central de China. En el sudeste la señal es opuesta; estos suelos del sudeste están caracterizados por fuertes reacciones de oxidación e hidrólisis. La goethita es el mineral magnético predominante.

Nótese, que en aquellos casos en los que se ha muestreado el suelo actual completo, el incremento de la señal magnética no es siempre en los mismos horizontes. En el centro de Estados Unidos, éste ocurre exclusivamente en el A ó A- AB, en tanto en Europa central es en el horizonte A y en el B.

En lo que respecta a los paleosuelos analizados están distribuidos en América del Norte (Alaska), Europa, norte de África y Asia.

Foster y Heller (1994) informan resultados obtenidos en la depresión de Tajik, Asia central. Su registro es análogo al chino, con paleosuelos (tipo pedocomplex) interdigitados en potentes (*ca.* 100 m) secuencias de loess que manifiestan un incremento en la susceptibilidad magnética; por otra parte también encuentran aumento en la intensidad de la magnetización remanente natural (MRN). Dado el aumento de la intensidad de MRN es evidente que la señal pedogénica no puede atribuirse exclusivamente a la génesis de partículas superfina.

En el *plateau* de Matmata, sur de Túnez,

aflora una potente secuencia de loess y paleosuelos intercalados. Estos paleosuelos tienen una señal magnética controlada por neo-minerales ferromagnéticos (Dearing *et al.* 2001); éstos son predominantemente partículas superfina y anti-ferromagnéticos.

En Europa central, paleosuelos interdigitados con loess afloran en distintas localidades de República Checa (Foster *et al.* 1996 y Oches y Banerjee 1996). En estos paleosuelos la señal magnética incrementada es asociada a la pedogénesis en forma similar al registro del *plateau* chino. Resultados análogos han sido reportados a lo largo del río Danubio, Rumania. Secuencias de loess y paleosuelos asignadas al Cenozoico tardío muestran un incremento de la señal magnética en los paleosuelos (Panaiotu *et al.* 2001).

Lagroix y Banerjee (2002) presentaron resultados de anisotropía de fábrica magnética, así como variaciones de propiedades magnéticas a lo largo de secuencias de loess y paleosuelos de Alaska. Los autores encontraron una disminución de la señal magnética en los horizontes de paleosuelos. El decrecimiento de los paleosuelos estaría asociado a meteorización de los minerales ferrimagnéticos. Estudios multidisciplinarios en secuencias de loess en Siberia (Zhu *et al.* 2003) describen un decrecimiento de la señal magnética en paleosuelos interdigitados en los paquetes de loess. Los autores adjudicaron este comportamiento a diferencias en los tamaños de partículas depositadas en los períodos más fríos respecto de los más cálidos. No se observó fracción superfina. La intensidad del viento sería en este caso el mecanismo modelador principal de la señal magnética.

Bloemendal y Liu (2005) presentan un estudio de magnetismo de rocas y geoquímica en dos secuencias asignadas al Cenozoico tardío de China (Duanjiapo y Luochuan). Aunque un incremento general de la señal magnética es detectado en el área, los autores señalaron discrepancias entre los indicadores geoquímicos y magnéticos.

Finalmente, Orgeira y Compagnucci

(2006) presentan una revisión de los resultados magnéticos obtenidos en paleosuelos pleistocenos tardíos-holocenos de la llanura pampeana en Argentina. En toda el área encontraron decrecimiento de la concentración de minerales ferromagnéticos en coincidencia con los horizontes edafizados.

Todos los sitios analizados en esta contribución incluyen resultados magnéticos obtenidos por otros autores en suelos actuales y paleosuelos desarrollados exclusivamente en loess. De esta forma se restringe el análisis a solo un tipo de sedimentos.

METODOLOGÍA

PWS (índice potencial de almacenamiento de agua) es una estimación del almacenamiento de agua en el suelo. El algoritmo usado es el propuesto por Orgeira y Compagnucci (2006).

$PWS = PP - PETc$ PP precipitación anual y PETc es una estimación de la evapotranspiración.

La evapotranspiración (PET) es una estimación de la pérdida de agua desde el suelo a la atmósfera por transpiración de la vegetación y por evaporación directa. PET puede estimarse por parámetros meteorológicos directos como temperatura y radiación solar. La fórmula empírica PET básica (Thorntwaite 1948) está dada por

$$PET = 16 (10 T / I)^a \quad (1)$$

con: PET= evapotranspiración potencial mensual (mm)

T = temperatura media mensual (°C).

I = índice de calentamiento para un área dada calculado con la sumatoria de 12 índices mensuales i , en la que se excluyen meses con temperatura media negativa. i es dado por las temperaturas medias mensuales según la siguiente fórmula:

$$i = (T / 5)^{1.514}$$

a = exponente empírico función de I :

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49$$

El valor corregido de PET tiene en cuenta la duración del día, considerando la dependencia de la latitud de la localidad y

del período del año. Está dado por:
 $PETc = PET \times (N/12) \times (d/30)$ (Dunne y Leopold 1978).

N = valor medio mensual de duración del día (hs)

d = días en el mes

En la presente contribución se emplearon las siguientes bases de datos: *University of Delaware (UDel)*; *Monthly global gridded high resolution station (by) data for air temperature and precipitation from 1950-1999 data set* (versión 1.02); *Global Historical Climatology Network (GHCN versión 2)*.

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL MATERIAL PARENTAL DE LOS SUELOS ANALIZADOS

Hemisferio Norte y centro de Norte América

Los depósitos de loess del centro de Norte América (Estados Unidos) están ampliamente distribuidos, con un buen registro estudiado de los loess de la última glaciación. Los suelos considerados en la presente contribución se han desarrollado en el extremo centro este de la provincia fisiogeográfica *Great Plain* y principalmente en las *Central Lowlys (Lowland)*.

En la *Central Lowland* tres unidades de loess de edad pleistocena media a tardía han sido identificadas y correlacionadas. En orden estratigráfico decreciente se mencionan el *Loveland loess* (paleosuelo desarrollado sobre loess modificado, que representa el estadio isotópico 5, MIS 5), *Roxana silts/Formación Pisgah* y la Formación Peoria. *Roxana silts/Formación Pisgah* y la Formación Peoria se depositaron durante la última glaciación (Wisconsin, MIS 4 y 2).

La Formación Peoria se depositó durante el último máximo glacial (LGM, MIS 2) y es probablemente el registro más potente de este evento en el mundo (Bettis *et al.* 2003a). Este loess está compuesto por sedimentos limosos con incrementos locales de la fracción arena. Las secciones inferiores muestran variado grado de re-trabajo posterior a la depositación eólica.

El importante relieve local de algunas áreas generó procesos gravitacionales en el depósito (Bettis *et al.* 2003a). Estos procesos complican la interpretación estratigráfica en algunas secciones. Por otra parte, evidencias geológicas en las secciones inferiores de la secuencia sugerirían presencia de suelos *permafrosts* durante las fases tempranas de depositación del loess (Bettis *et al.* 2003b). Todas estas manifestaciones sugieren que la condición de material eólico pristino del loess Peoria pudo ser alterada en diferentes grados.

La fuente del loess Peoria de las *Central Lowlys (Lowland)* fue tradicionalmente localizada en los valles fluviales que transportaban aguas de deshielo del casquete de hielos Laurentide (Bettis *et al.* 2003a). Sin embargo, otras contribuciones (Bettis *et al.* 2003b, entre otros) sugieren fuentes adicionales no glaciales para algunos de estos depósitos.

El contenido de minerales de arcilla, y de Fe - Al asociado a él, muestra un incremento de E a O en las Central Lowlys (Lowland) hacia las Great Plains (Bettis *et al.* 2003a). Esto puede interpretarse como una variación entre las fuentes.

Los depósitos de loess de Mississippi y Missouri muestran un remarcable contenido de carbonatos. Este contenido deriva de las calizas marinas y de la plataforma carbonática paleozoica. Loess con alto contenido de carbonato proviene del Lago Michigan y del lóbulo Erie del casquete Laurentide; loess con bajo contenido de carbonato proviene de áreas glaciares y no-glaciares del oeste (Bettis *et al.* 2003). Las direcciones de paleovientos inferidas sobre la base de los análisis geoquímicos, la potencia de las secuencias, y la granulometría de las unidades sugieren un dominante transporte del material desde O/NO hacia el E/SE (Muhs y Bettis 2000).

Por otra parte, estudios llevados a cabo por Muhs *et al.* (2001) muestran que la composición del material parental del loess Peoria es similar a través de una transecta a lo largo del río Mississippi desde Iowa a Louisiana. Sin embargo, los resultados sugieren que suelos en la parte nor-

te del valle recibieron loess de grano fino originado en fuentes del oeste tanto en el último período glacial, durante el Holoceno ó en ambos. Un incremento en el contenido de arcillas, asociado con valores de Al_2O_3/TiO_2 y Fe_2O_3/TiO_2 es registrado en la transecta desde el sur al norte.

En síntesis, las evidencias geológicas del registro sedimentario de los depósitos del centro de USA indican fuentes de aporte variadas lo que sugiere heterogeneidad de diferentes grados en la mineralogía, textura y meteorización. Por otro lado, se observa un proceso de meteorización, coetáneo con la sedimentación, en el material parental de las diferentes áreas bajo análisis en esta contribución.

Alaska

El loess central de Alaska tiene una composición mineralógica diferente de la de los otros depósitos del centro de Norte América. Es dominante el cuarzo con feldespato subordinado, tiene una inusual cantidad de Fe_2O_3 y Al_2O_3 y ausencia total de carbonatos. El contenido de arcillas es bajo (Muhs *et al.* 2003). El loess de Alaska deriva de variados tipos de litologías tales como granitos, metabasaltos y esquistos.

Las características de los paleosuelos indican que la sedimentación de estos depósitos fue episódica. Es probable que la velocidad de depositación del loess disminuyó hasta ser superada por la velocidad de pedogénesis; de ser esto último así, podría sugerirse que en este caso la depositación del loess y la pedogénesis no han sido un proceso de *turn off-turn on* (Muhs *et al.* 2003), tal como sí ocurre en otras partes del mundo como Europa y parte central de Estados Unidos.

El espesor de los depósitos loésicos holocénicos, así como el tamaño de partícula muestra una sistemática disminución al alejarse de la presumible fuente. El grado de desarrollo de los suelos, así como la meteorización en los horizontes superficiales se incrementa al alejarse, debido a menores velocidades de sedimentación y a una mayor mezcla (Muhs *et al.* 2004).

Sudamérica

Llanura Pampeana

Los depósitos de loess y loess retrabajado se encuentran profusamente distribuidos a lo largo de la llanura pampeana, incluyendo depósitos en las provincias de San Luis, Córdoba, Santa Fe, La Pampa y Buenos Aires (Frenguelli 1950, 1955, Teruggi 1957, Muhs y Zárate 2001, entre otros). Son secuencias sedimentarias de loess y paleosuelos interdigitados que representan los períodos glaciares e interglaciares principalmente del Pleistoceno con algunos depósitos del Holoceno medio a tardío.

Estos depósitos incluirían principalmente el registro de los MIS 2 (LMG), 4, encontrándose también representados a través de paleosuelos los MIS 5; en algunas localidades al norte de la provincia de Buenos Aires podrías aflorar depósitos asignables hasta el MSI 11 (Tófaló *et al.* 2008).

Estos sedimentos eólicos son limo arcillo-arenosos con notable homogeneidad textural y mineralógica, principalmente en NE de la provincia de Buenos Aires. Los contenidos de arena se incrementan hacia el O y hacia el S, clasificándose como arenas loessoides y loess arenoso (Zárate y Blasi 1993).

Durante los períodos fríos y secos se produce la acumulación de material transportado por el viento y redepósito posterior por procesos fluviales. Los vientos predominantes transportadores del material loésico provendrían del SO (Teruggi 1957) y el mecanismo está asociado a retransporte eólico de partículas clásticas de origen andino, previamente movilizadas por acción glaci-fluvial. Estudios más recientes (Smith *et al.* 2003) sugieren derivación del material parental desde los Andes por un transporte de flujo de los vientos provenientes del oeste.

Por otro lado, estos sedimentos tienen un abundante contenido de vidrio volcánico en su composición (Teruggi 1957, Teruggi *et al.* 1957, Muhs y Zárate 2001, entre otros). El vidrio pampeano frecuentemente parece no estar muy alterado. Sin embargo, el contenido de As en solución en

aguas subterráneas sugiere alteración parcial de los vidrios volcánicos constituyentes del loess (Nicolli *et al.* 2004).

Europa

El loess europeo muestra notables diferencias geológicas entre afloramientos de las distintas regiones del continente (Derbyshire 2001). Diferentes aspectos tales como: proveniencia de los limos, alteración postdeposicional o presencia de tefra (como en Hungría) son relevantes. Con referencia a los depósitos de Europa del Este, están aún bajo discusión diversos problemas como la propia génesis, las condiciones de acumulación, la estratigrafía y la correlación entre diferentes depósitos (Bolikhovskaya y Molodkov 2006). Reconstrucciones palinológicas permiten sugerir que cambios dentro de secuencias loess-paleosuelos en una sección pueden no ser atribuidas a cambios de condiciones frías y secas a cálidas y húmedas. Evidencias de esporas y polen sugieren que muy frecuentemente horizontes de paleosuelos corresponden a períodos fríos incluso a un máximo frío (Bolikhovskaya y Molodkov 2006).

Resultados obtenidos por Khokhlova *et al.* (2001) en la depresión Chechenia indican que durante el Holoceno los procesos de formación de suelos fueron acompañados por episódicos períodos de deposición de particulado en el horizonte superior de la secuencia. Sin embargo, los horizontes de suelos no aparecen sepultados y se aprecian como normales. Un modelo sinlitogénico de pedogénesis fue propuesto para suelos de este área.

Todas estas características muestran el grado de complejidad geológica que presentan los depósitos de Europa del Este, lo que dificulta ciertamente la completa comprensión de los procesos pleistocenos tardío-holocenos, incluyendo la formación del suelo actual.

China

El Plateau Chino tiene un registro de depósitos eólicos que muestra la ocurrencia de sistema monzónico asiático desde hace 4,8/4,1 Ma (Balsam *et al.* 2004). Este

registro incluye secuencias sedimentarias pleistocenas a holocenas tardías sobreyacentes a depósitos de arcillas rojas terciarias (Ding *et al.* 2001). El monzón invernal del NO es frío y seco, y es el agente que distribuye el polvo en el plateau que proviene desde varios desiertos del N y NO de China y del desierto de Gobi. Durante el verano, predominan vientos húmedos y templados del SE.

Análisis químicos e isotópicos Nd-Sr muestran un alto grado de homogeneidad, sugiriendo que la región fuente del polvo debe haber estado sometida a reciclado y procesos de mezclado sedimentario (Jahn *et al.* 2001). Asimismo estos autores encuentran que diferentes indicadores de intensidad de pedogénesis, químicos y magnéticos, no presentan una correlación lineal con la precipitación.

Por otra parte, la distribución espacial de la susceptibilidad magnética total, en registros de los períodos interglaciares en los últimos 0,6 Ma, ha mostrado una altamente consistente correlación entre este parámetro físico y la distribución de las precipitaciones y temperaturas actuales (Hao y Guo 2005).

Como se desprende de los ítems anteriores, a nivel global existen gran diversidad de diferenciaciones litológicas granulométricas e inclusive genéticas en las secuencias loess-paleosuelos, inclusive en una misma región. Este hecho ya fue señalado por precursores en el campo de la geología.

Frenguelli (1955) ha sido pionero en establecer criterios de similitud y discrepancia entre loess de diferentes continentes. Es así que encuentra semejanzas texturales y genéticas entre los depósitos chinos, europeos y sudamericanos. Sin embargo las diferencias composicionales son relevantes puesto que las rocas originarias son totalmente distintas. El loess europeo y chino es altamente cuarzo (alrededor de 50%), en tanto en el sudamericano el cuarzo es sumamente escaso y puede considerarse como mineral accesorio. Solo en aquellos casos en donde hay retransporte (loess retrabajado) por acción fluvial con asimilación de de-

tritos provenientes de otras fuentes, el cuarzo puede ser abundante.

Un rasgo diferencial enfatizado por Frenguelli es que, el loess europeo y el chino (en menor grado) están caracterizados por el predominio de partículas detríticas procedentes de un prolongado e intenso proceso de meteorización mecánica; en el loess pampeano predominan partículas derivadas de descomposición hidrolítica. Como consecuencia, ante la acción de un medio ácido el loess pampeano muestra una solubilidad mucho mayor que el loess europeo ó chino. Finalmente la diferencia más conspicua es la presencia de vidrio volcánico. Como se ha mencionado en párrafos anteriores, el loess pampeano contiene altos porcentaje de vidrio volcánico, los que pueden llegar al 60 % en horizontes cineríticos. El vidrio volcánico es un componente ampliamente distribuido areal y temporalmente en el loess pampeano. Los clastos de vidrio están totalmente ausentes en el loess chino y en el europeo (Frenguelli 1950). En Norte América, solo parte de los loess de la *Great Plain* tienen componentes volcanoclasticas, y éstas son material retrabajado proveniente de rocas terciarias (Muhs y Zárate 2001).

DATOS OBTENIDOS

Se calculó con la base de datos de Dela-

ware (USA) la distribución a nivel mundial de los índices potenciales de almacenamiento de agua (Fig. 1). Ejemplos de valores extremos de índice potencial se encuentran en áreas geográficas con climas extremos. En el NE de India (25,25N 92,25E) puede alcanzar valores positivos 9.200 aproximadamente. Esta área está sujeta a régimen monzónico con altísima precipitación en el verano por efecto del cinturón intertropical (CIT) que genera monzones con lluvias torrenciales asociado a alta nubosidad que atemperiza el incremento de la temperatura. En el invierno tienen poca precipitación pues el CIT está desplazado al Hemisferio Sur; el monzón de invierno circula del continente hacia el océano, la temperatura es baja; luego, también el PET es bajo.

Un clima extremo opuesto se encuentra en el extremo sur de Irán (25,75N 58,25E) con un índice PWS -7103,72. La zona es desértica con muy escasas precipitaciones y altas temperaturas.

Los depósitos de loess no se generan en estas áreas de climas extremos, sino en regiones con parámetros climáticos intermedios. Los resultados de los índices potenciales de almacenamiento de agua calculados para las localidades analizadas (década 71-80) están resumidos en los cuadros 1 (suelos) y 2 (suelos y paleosuelos). Asimismo, en los cuadros 1 y 2 se han repre-

sentado sucinta y cualitativamente las variaciones en la concentración de minerales ferrimagnéticos en el suelo respecto al material parental, inferida por los análisis magnéticos efectuados por otros autores. En las Figuras 2, 3, 4, 5 y 6 se han representados las distribuciones areales de estos índices en las regiones involucradas en el análisis, Asia, Europa, centro de Sudamérica, Norte América y Alaska, respectivamente.

DISCUSIÓN DE LOS DATOS

El primer punto a considerar, tal como surge del análisis del ítem anterior, es la existencia de gran diversidad de diferenciaciones litológicas, texturales (granulométricas) e inclusive genéticas en las secuencias loess-paleosuelos a nivel mundial. Tales diferencias se dan inclusive en una misma región. Luego, es esperable que el comportamiento de la señal magnética esté condicionado en alguna medida por estas diferencias. En consecuencia, parecería recomendable realizar inferencias a nivel regional en donde se garantice una relativa homogeneidad litológica y un modelo genético del depósito adecuado.

Las evidencias geológicas del registro sedimentario de los depósitos del centro de Norte América indican fuentes de aporte

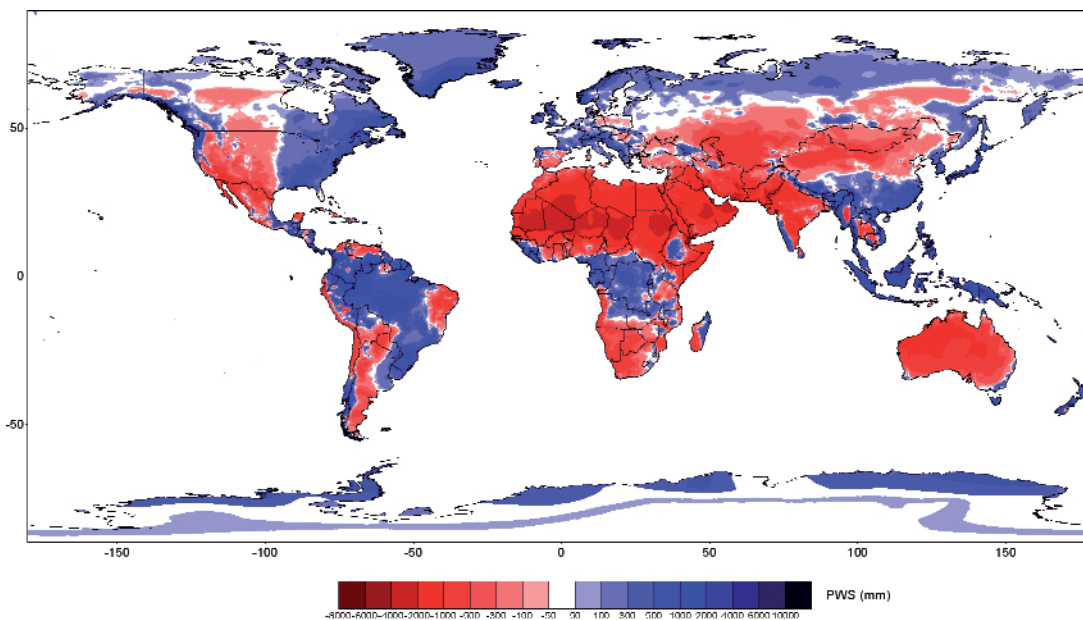


Figura 1: Mapa mundial de distribución de índices de potencial de almacenamiento de agua,

CUADRO 1: Índices de almacenamiento potencial de agua para suelos y variación de la concentración de minerales ferrimagnéticos inferida

| Lat | Long | Lat Delaware | Long Delaware | PWS (1971-80) | Variación concentración de Ferrimag. inferida |
|---|---------|--------------|---------------|---------------|---|
| EUROPA | | | | | |
| Russia (Maher <i>et al.</i> 2003) | | | | | |
| Stavropol | | | | | |
| 45,20 | 42,00 | 45,25 | 42,25 | -133,2 | + |
| Volgograd | | | | | |
| 48,49 | 43,43 | 48,25 | 43,25 | -250,1 | + |
| ASIA | | | | | |
| China plateau (Han <i>et al.</i> 1996) | | | | | |
| 35,75 | 107,63 | 35,75 | 107,75 | -111,7 | + |
| China plateau | | | | | |
| 34,30 | 108,93 | 34,25 | 108,75 | -215,5 | + |
| China SE | | | | | |
| 25,00 | 112,00 | 25,25 | 112,25 | 699,5 | - |
| SUDAMÉRICA | | | | | |
| Argentina (Orgeira y Compagnucci 2006) | | | | | |
| NE Prov. de Buenos Aires | | | | | |
| Zarate | | | | | |
| -33,68 | 300,32 | -33,75 | 300,25 | 286,6 | + |
| Verónica | | | | | |
| -35,35 | 302,72 | -35,25 | 302,75 | 170,3 | - |
| Bartel <i>et al.</i> (2006) | | | | | |
| SE Prov. de Buenos Aires | | | | | |
| -38,46 | -60,42 | -38,25 | 299,75 | 59,3 | + |
| NORTE AMÉRICA | | | | | |
| Estados Unidos (Geiss <i>et al.</i> 2004) | | | | | |
| Nebraska state | | | | | |
| Boone county | | | | | |
| 41,52 | -98,21 | 41,75 | 261,75 | -87,0 | + |
| USA (Geiss y Zanner 2006) | | | | | |
| Nebraska state | | | | | |
| Miriam Cemetery | | | | | |
| 41,01 | -100,66 | 41,25 | 259,25 | -179,1 | + |
| Prairie Pines | | | | | |
| 40,84 | -96,56 | 40,75 | 263,25 | -63,7 | + |
| Iowa state | | | | | |
| Mte. Calgary cemetery | | | | | |
| 40,87 | -95,42 | 40,75 | 264,75 | 176,6 | + |
| Missouri state | | | | | |
| Honey Crick CA | | | | | |
| 39,96 | -94,97 | 39,75 | 265,25 | 157,9 | + |
| Davisdale CA | | | | | |
| 39,04 | -92,63 | 34,25 | 267,25 | 207,91 | + |
| Nebraska (Geiss y Zanner 2007) | | | | | |
| Arbor Cem . | | | | | |
| 40,55 | -100,40 | 40,75 | 259,75 | -180,1 | + |

+ incremento en la concentración; - decrecimiento de la concentración.

variadas lo que sugiere heterogeneidad en la mineralogía y textura. Asimismo, se ha inferido una marcada meteorización coetánea con la sedimentación en el material parental de las diferentes áreas analizadas

en esta contribución. Asimismo, en suelos actuales se observa aporte simultáneo al actual proceso pedogenético. Estos procesos de competencia entre deposición y pedogénesis también se ob-

servan en Alaska y Europa del Este. Es esperable que esta competencia (pedogénesis *vs.* sedimentación) también haya estado presente en estadios cálidos del pasado. En consecuencia, la interpretación de la señal magnética de paleosuelos en estas áreas debe contemplar esta posibilidad, teniendo en cuenta que en general los vientos predominantes durante un estadio cálido podría no coincidir con los predominantes en un estadio frío; luego, las áreas de aporte durante la deposición de loess pueden no ser las mismas que durante la formación de paleosuelos. Por otra parte, como ya ha sido mencionado anteriormente en algunas regiones del este de Europa, las secuencias de loess y paleosuelos podrían no ser consideradas como directos indicadores de los correspondientes cambios climáticos; los paleosuelos podrían haberse formado en períodos fríos y húmedos. Esta posibilidad, elaborada sobre la base de datos paleolitológicos, complica los modelos que relacionan la señal magnética con meteorización como función de la temperatura y precipitaciones para estas regiones. Todas estas características muestran el grado de complejidad que presentan los depósitos de loess, lo que conduce a un alto grado de dificultad en la comprensión y comparación a nivel mundial de los procesos de génesis de la señal magnética en paleosuelos. En consecuencia, la aplicación exclusivamente de una metodología geofísica sin un estudio multidisciplinario de soporte no es apropiada. Sin embargo, el índice potencial muestra una tendencia con la señal magnética registrada en suelos (Cuadro 1). En los suelos actuales del sudeste de China el índice potencial positivo (Cuadro 1, Fig. 2) se asocia a decrecimiento de la señal magnética, lo que es consistente con los suelos de Verónica en la llanura pampeana (Fig. 4). El incremento encontrado por Orgeira y Compagnucci (2006) en horizontes superficiales de suelos de Zárate (llanura pampeana) debe considerarse como estacional, tal como fue propuesto como hipótesis alternativa por las citadas autoras. Los resultados obtenidos en el sur de la

provincia de Buenos Aires (Bartel *et al.* 2006) relacionan valores de índice potencial positivos y bajos (Cuadro 1, Fig. 4) con incremento moderado de susceptibilidad en los horizontes superficiales. Es importante recalcar aquí que dado el alto contenido de fracción arena en el material parental es altamente probable que el umbral de índice potencial para generar la pérdida de minerales ferrimagnéticos detríticos por reducción se desplace hacia valores más altos respecto a aquel de la región N de la llanura. Ello se fundamenta en que sedimentos loésicos más arenosos son más porosos, están más aireados y mejor drenados, y consecuente necesitan mayor anegamiento para generar ambientes anaeróbicos que provoquen pérdida de partículas magnéticas. Un condicionamiento importante en este caso sería la textura del sedimento.

Para China y suelos sobre materiales loésicos de Sudamérica, el umbral entre generación de neominerales y pérdida de minerales detríticos estaría en valores positivos, cercanos a 0.

Si se comparan los resultados de los estados de Iowa y Missouri (Estados Unidos, Fig. 5) con Verónica (Llanura pampeana, Argentina) (Cuadro 1, Fig. 4), todas tienen índices de potencial de almacenamiento positivos y similares. Sin embargo, en Norte América hay incrementos moderados de la señal magnética en el horizonte superficial (A y Ap), en tanto en Argentina en suelos y paleosuelos en loess hay depleción de minerales ferrimagnéticos detríticos, principalmente en el horizonte B. En estos casos se considera que un factor importante que modula la señal magnética y condiciona fuertemente el umbral del índice potencial es la presencia de vidrio volcánico. Contenidos elevados de sílice en el agua poral, provenientes del vidrio volcánico abundante en el loess sudamericano, favorecería la depleción de la fracción ferrimagnética detrítica (magnetita y titanomagnetita), en condiciones que no estarían obviamente relacionadas con el estado redox del suelo. Se destaca que con valores altos y positivos de índice potencial (como el de

CUADRO 2: Índices de potencial de almacenamiento de agua para todos los sitios analizados (suelos y paleosuelos) y variación de la concentración de minerales ferrimagnéticos inferida.

| Lat | Long | Lat Delaware | Long Delaware | PWS (1971-80) | Variación concentración de Ferrimag. inferida |
|---|---------|--------------|---------------|---------------|---|
| EUROPA | | | | | |
| Russia (Maher <i>et al.</i> 2003) | | | | | |
| 45,20 | 42,00 | 45,25 | 42,25 | -133,20 | + |
| 48,49 | 43,43 | 48,25 | 43,25 | -250,06 | + |
| Rumania (Panaiotu <i>et al.</i> 2001) | | | | | |
| 44,16 | 26,83 | 44,25 | 26,75 | -132,62 | + |
| Czech Republic (Foster <i>et al.</i> 1996, Oches y Banerjee 1996) | | | | | |
| 50,00 | 15,00 | 50,25 | 15,25 | -214,73 | + |
| 49,00 | 16,00 | 49,25 | 16,25 | -36,70 | + |
| AFRICA | | | | | |
| Tunisia (Dearing <i>et al.</i> 2001) | | | | | |
| 33,50 | 10,00 | 33,75 | 10,25 | -789,98 | + |
| ASIA | | | | | |
| China plateau (Han <i>et al.</i> 1996, Bloemendal y Liu 2005) | | | | | |
| Luochuan | | | | | |
| 35,75 | 107,63 | 35,75 | 107,75 | -111,68 | + |
| Duanjiapo | | | | | |
| 34,30 | 108,93 | 34,25 | 108,75 | -215,48 | + |
| China SE (Han <i>et al.</i> 1996) | | | | | |
| 25,00 | 112,00 | 25,25 | 112,25 | 699,46 | - |
| Uzbekistan, Tajik (Forster y Heller, 1994) | | | | | |
| 38,00 | 68,00 | 38,25 | 68,25 | -495,00 | + |
| Kurtak, S Siberia (Zhu <i>et al.</i> 2003) | | | | | |
| 55,10 | 91,40 | 55,25 | 91,25 | -123,07 | - |
| SUDAMERICA | | | | | |
| Argentina (Orgeira y Compagnucci 2006) | | | | | |
| NE Prov. de Buenos Aires | | | | | |
| Zarate | | | | | |
| -33,68 | 300,32 | -33,75 | 300,25 | 286,56 | + |
| Verónica | | | | | |
| -35,35 | 302,72 | -35,25 | 302,75 | 170,26 | - |
| Bartel <i>et al.</i> (2006) | | | | | |
| SE Prov. de Buenos Aires | | | | | |
| -38,46 | -60,42 | -38,25 | 299,75 | 59,25 | + |
| NORTE AMERICA (USA) | | | | | |
| Estados Unidos (Geiss <i>et al.</i> 2004) | | | | | |
| Nebraska state | | | | | |
| Boone county | | | | | |
| 41,52 | -98,21 | 41,75 | 261,75 | -86,95 | + |
| USA (Geiss y Zanner 2006) | | | | | |
| Nebraska state | | | | | |
| Miriam Cementery | | | | | |
| 41,01 | -100,66 | 41,25 | 259,25 | -179,07 | + |
| Prairie Pines | | | | | |
| 40,84 | -96,56 | 40,75 | 263,25 | -63,66 | + |
| Iowa state | | | | | |
| Mte. Calgary cementery | | | | | |
| 40,87 | -95,42 | 40,75 | 264,75 | 176,55 | + |
| Missouri state | | | | | |
| Honey Crick CA | | | | | |
| 39,96 | -94,97 | 39,75 | 265,25 | 157,86 | + |
| Davisdale CA | | | | | |
| 39,04 | -92,63 | 34,25 | 267,25 | 207,91 | + |
| Nebraska (Geiss y Zanner 2007) | | | | | |
| Arbor Cem . | | | | | |
| 40,55 | -100,40 | 40,75 | 259,75 | -180,1 | + |
| Alaska (Lagroix y Banerjee 2002) | | | | | |
| 64,60 | -149,00 | 64,75 | 211,75 | -49,09 | - |

+ incremento en la concentración; - decrecimiento de la concentración.

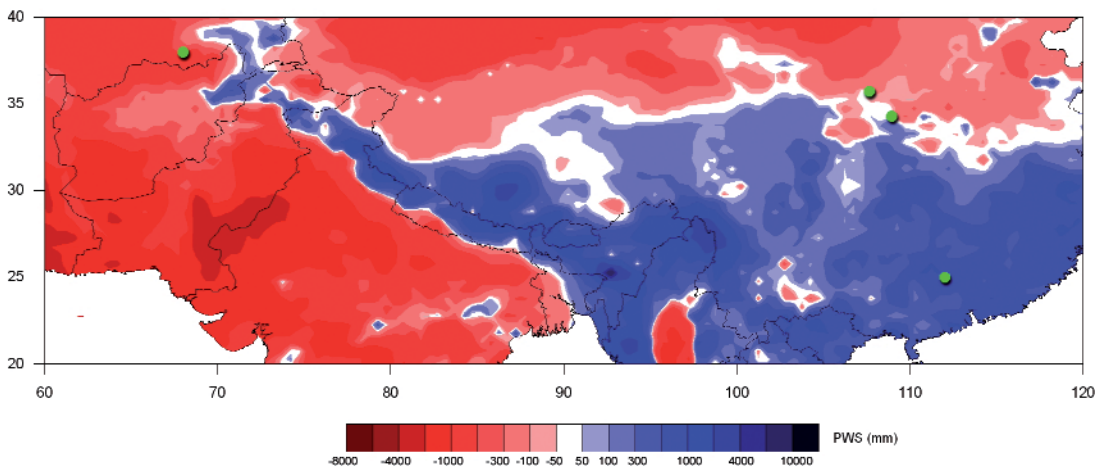


Figura 2: Distribución de PWS en Asia central.

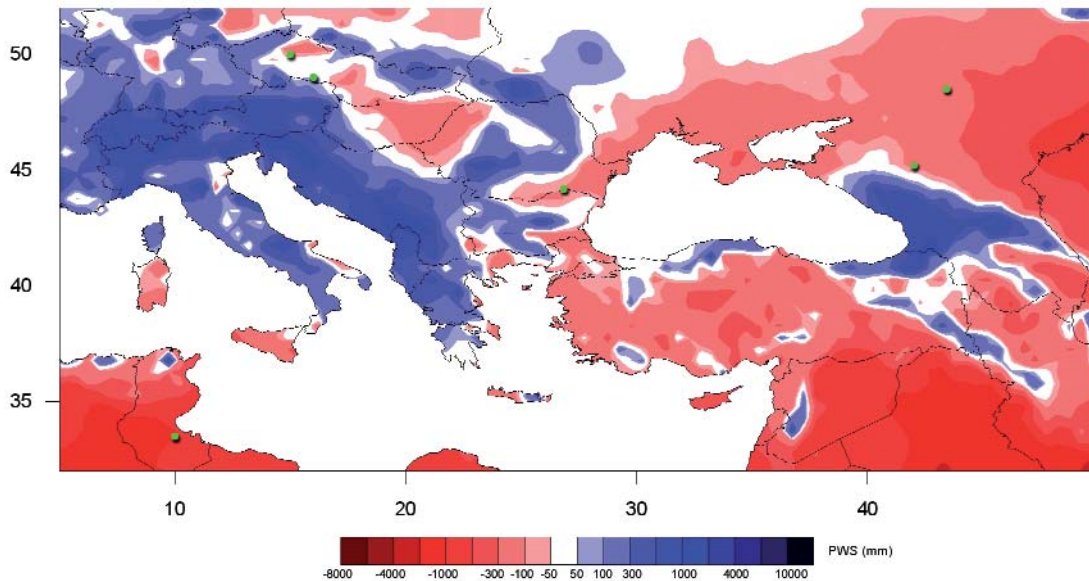


Figura 3: Distribución de PWS en Europa central y oriental.

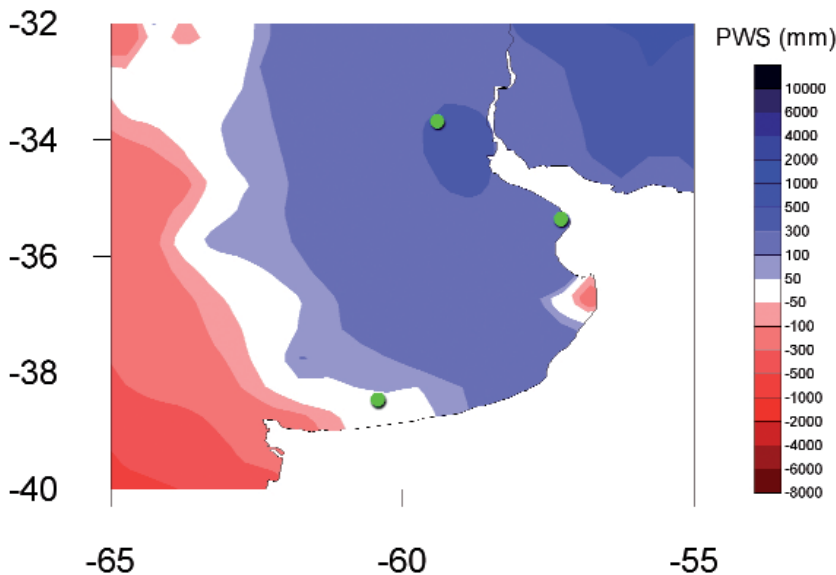


Figura 4: Distribución de PWS en Llanura Pampeana (Prov. de Buenos Aires).

Zárate), la generación de partículas magnéticas ferrimagnéticas sería sumamente restringida y en el horizonte superficial; las condiciones en el horizonte de iluvación (B) no serían apropiadas para la persistencia de las partículas ferrimagnéticas neoformadas. En otras palabras, la presencia de vidrio volcánico puede conducir a que con un mismo almacenamiento de agua en el suelo en una región haya depleción de minerales ferromagnéticos, en tanto en otra (sin vidrio) el suelo esté casi balanceado sin pérdida de fracción detrítica ferrimagnética.

Por otra parte, dados los antecedentes geológicos del loess del centro de Norte América no puede descartarse aporte de material ferromagnético holocénico que afecte la señal magnética del horizonte A. Los índices potenciales negativos del *pla-*

teau chino y Rusia (Cuadro 1) se han asociado en todos los casos analizados a incrementos en la señal magnética.

En cuanto a los paleosuelos, para analizar su conducta magnética se deben tener en cuenta algunas consideraciones. En principio un supuesto paleoclimático; se considera que, *sensu lato*, los parámetros climáticos del estadio isotópico actual son similares a aquellos de los interglaciares pasados, al menos para el lapso en estudio (Pleistoceno tardío-Holoceno).

Por otra parte, también es fundamental tener en cuenta cuales son los horizontes que más frecuentemente se preservan en el registro geológico. Si en un área el horizonte del suelo actual que manifiesta la señal magnética más conspicua es el superficial, parece poco probable que esta señal se mantenga con el tiempo; luego, en algunas localidades las señales magnéticas de los paleosuelos no serían fiel reflejo de las condiciones paleoclimáticas coetáneas con la formación del suelo.

Resultados obtenidos en la llanura pampeana (Argentina) en paleosuelos asignados al Pleistoceno tardío muestran una correlación cualitativa entre índices potenciales positivos y depleción de minerales ferrimagnéticos (resumidos en Orgeira y Compagnucci 2006).

Los paleosuelos contemplados en la presente contribución aflorantes en Rumanía, República Checa, China, Uzbekistán, (Cuadro 2, Figs. 2, 3) muestran correlación cualitativa entre índice potencial negativo y generación de partículas ferrimagnéticas con consecuente incremento de la señal magnética.

Dos de los casos analizados Alaska y Siberia (Cuadro 2, Fig. 6) muestran un comportamiento distinto. En ambos casos el índice potencial es negativo y la señal magnética está caracterizada por un empobrecimiento de partículas magnéticas en los paleosuelos. Dada la localización geográfica a latitudes medias altas y altas de estos sitios, es esperable que las variables climáticas precipitaciones y temperatura que prevalecen en latitudes medias tengan menor influencia que el viento. La variación de la intensidad del vien-

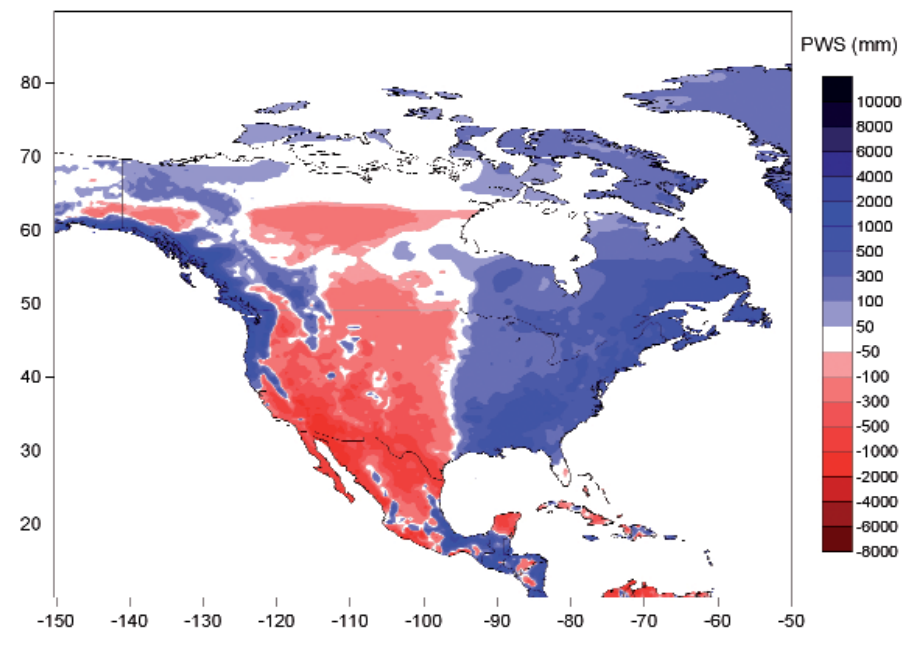


Figura 5: Distribución de PWS en Norte América.

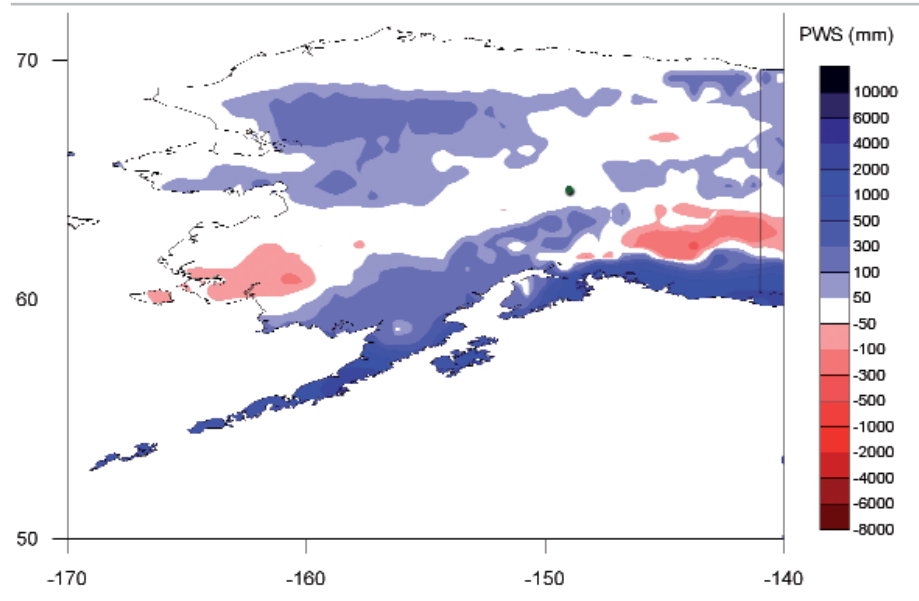


Figura 6: Distribución de PWS en Alaska.

to entre períodos fríos (glaciaros) y cálidos (interglaciaros) es el factor climático más conspicuo en la modulación de la señal magnética (Evans y Heller 2003). Este modelo fue el propuesto por Zhu *et al.* (2003) para Siberia; asimismo se considera que este modelo genético es el apropiado para interpretar los datos magnético obtenidos en Alaska.

Los resultados aquí expuestos inducen a restringir el uso de climato función en resultados magnéticos. En sentido estricto,

la obtención de un *proxy* a través de resultados de magnetismo ambiental debería seguir el siguiente camino: una vez verificada la homogeneidad mineralógica en la depositación del loess en espacio y tiempo en un área, analizar las variaciones de la mineralogía magnética entre loess y suelo actual; determinar las variaciones de la mineralogía magnética entre loess y paleosuelo en la misma secuencia estratigráfica. Sobre la base de ello, dependiendo del grado de cuantificación al que se

haya arribado, se podrá valorar la variación del índice potencial del evento paleoclimático (interglacial ó interestadial) bajo estudio, respecto del presente.

CONCLUSIONES

- Para latitudes medias, la señal magnética de suelos y paleosuelos muestra correlación cualitativa con el índice potencial. Índices de potencial de almacenamiento positivos están caracterizados por pérdida de partículas ferrimagnéticas detríticas. Índices de potencial de almacenamiento negativos están caracterizados por incremento de la señal magnética. En latitudes altas la variable climática preponderante como modeladora de la señal magnética en paleosuelos no sería el almacenamiento de agua sino la intensidad del viento.

- El umbral tentativo entre enriquecimiento y depleción se ubicaría en índices potenciales más bajos (menos almacenamiento de agua en el suelo) cuando hay vidrio volcánico (ó eventualmente biosílico) como componente abundante en el material parental. En el caso del loess Sudamericano parecería ser en valores de índice potencial cercanos a 0. Cuando no hay disponibilidad de sílice en el agua poral, no hay vidrio volcánico en el material parental, tal el caso de China, se pasa de enriquecimiento a depleción en umbrales más altos.

- La textura del material parental sería también condicionante del umbral del índice potencial de almacenamiento de agua entre enriquecimiento y depleción de la señal magnética.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET (subsido PIP5659/05, PIP5006/05), Agencia PICT 0382/07, y a la UBA (subsidos X236, X219/08 y X016). Asimismo, agradecen a los Departamentos de Ciencias Geológicas y Ciencias de la Atmósfera de la FCEN de la Universidad de Buenos Aires. Finalmente a los árbitros del trabajo, Dra. A.M. Sinito y Dra. M. Mena por sus valiosos aportes y comentarios.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Balsam, W., Ji J. y Chen, J. 2004. Climatic interpretation of the Luochuan y Lingtai loess sections, China, based on changing iron oxide mineralogy and magnetic susceptibility. *Earth and Planetary Science Letters* 223: 335-348.
- Banerjee, S.K. 2006. Environmental magnetism of nanophase iron minerals: testing the biomineralization pathway. *Physics of the Earth and Planets Interiors* 154(3-4): 210-221.
- Banerjee, S. K. y Hunt, C. 1993. Separation of local signals from the regional paleomonsoon record of the Chinese loess plateau. A rock-magnetic approach. *Geophysical Research Letters* 20(9): 843-846.
- Bartel, A., Bidegain, J.C. y Sinito, A.M. 2006. Señal de incremento magnético en suelos del sur de la región pampeana. 10º Jornadas pampeanas de Ciencias Naturales, La Pampa, Argentina, Actas 4 p., Santa Rosa
- Bettis III, E.A., Muhs, D.R., Roberts, H.M. y Wintle, A.G. 2003a. Last glacial loess in the conterminous USA. *Quaternary Science Reviews* 22: 1907-1946.
- Bettis III, E.A., Mason, J.P., Swinehart, J.B., Miao, X., Goble, P.R., Loope, D.B., Jacobs, D. y Roberts, H.M. 2003b. Cenozoic eolian sedimentary systems of the USA mid-continent. En Eastbrook, D.J. (ed.) *Quaternary geology of the United State*, INQUA 2003, 195-218, Reno.
- Bloemendal, J. y Liu, X. 2005. Rock magnetism and geochemistry of two plio-pleistocene Chinese loess-paleosols sequences- implications for quantitative paleoprecipitation reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 226: 149-166.
- Bolikhovskaya, N.S. y Molodkov, A.N. 2006. East European loess-paleosol sequences: palynology, stratigraphy and correlation. *Quaternary International* 149: 24-36.
- Dearing, J.A., Livingstone, I.P., Bateman, M.D. y White, K. 2001. Paleoclimate records from OIS 8.0-5.4 recorded in loess-paleosol sequences on the Matmata Plateau, southern Tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating. *Quaternary International* 76/77: 43-56.
- Derbyshire, E. 2001. Characteristics, stratigraphy and chronology of loess and paleosols, and their application to climatic reconstruction: a preface. *Quaternary International* 76-77: 1-5.
- Ding, Z.L., Yang S.L., Sun, J.M. y Liu, T.S. 2001. Iron geochemistry of loess and red clay deposits in the Chinese Loess Plateau and implications for long term Asian monsoon evolution in the last 7 Ma. *Earth and Planetary Science Letters* 185: 99-109.
- Dunne, T. y Leopold, L.B. 1978. *Water in Environmental Planning*, W. H. Freeman and Company ed. , 818 pp. , San Francisco.
- Evans, M.E. y Heller, F. 2003. *Environmental magnetism: Principles and Applications of enviromagnetics*. Academic press. Elsevier Scien-cc, 299 p. San Diego.
- Fang, Xiao-Min, Li, Ji-Jun, Banerjee, S.K., Jackson, M., Oches, E. y Van der Voo, R. 1999. Millennial-scale climatic change during the last interglacial period: Superparamagnetic sediment proxy from paleosol S1, western Chinese Loess Plateau. *Geophysical Research Letters* 26(16): 2485-2488.
- Frenguelli, J. 1950. Rasgos generales de la morfología y geología de la provincia de Buenos Aires. Provincia de Buenos aires, Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Buenos Aires. Laboratorio de Ensayos de Materiales e Investigaciones Tecnológicas (LEMIT), Serie II, 33: 1-72, La Plata.
- Frenguelli, J. 1955. Loess y limos pampeanos. Ministerio de Educación de la Nación, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo de La Plata, Serie Técnica y didáctica 7, 88 p., La Plata.
- Foster, T. y Heller, F. 1994. Paleomagnetism of loess deposits from Tajik depression (Central Asia). *Earth and Planetary Science Letters* 128: 501-512.
- Foster, T, Heller, F., Evans, M.E. y Havlicek, P. 1996. Loess in Czech republic: magnetic properties and paleoclimate. *Studia Geophysica et Geodaetica* 3(40): 243-261.
- Geiss, C. y Zanner, W. 2006. How abundant is pedogenic magnetite? Abundance and grain size estimates for loessic soils based on rock magnetic analyses. *Journal of Geophysical Research* 111, B12S21, doi: 10.1029/2006JB004564.
- Geiss, C. y Zanner, W. 2007. Sediment magnetic signature of climate in modern loessic soils from the Great plains. *Quaternary International* 162-163: 97-110.
- Geiss, C., Zanner, W., Banerjee, S.K. y Joanna, M. 2004. Signature of magnetic enhancement in a loessic soil in Nebraska, United States of

- America. *Earth and Planetary Science Letters* 228: 355-367.
- Hao, Q. y Guo, G. 2005. Spatial variations of magnetic susceptibility of Chinese loess for the last 600 kyr: Implications for monsoon evolution. *Journal of Geophysical Research* 110, B12101, doi:10.1029/2005JB003765, 2005.
- Han, J., Lu, H., Wu, N. y Guo, Z. 1996. Magnetic susceptibility of modern soils in China and climate conditions. *Studia Geophysica et Geodetica*, 40, 262-275.
- Heller, F., Shen, C. D., Beer, J., Liu, X. M., Liu, T. S. y Bronger, A. 1993. Quantitative estimates and paleoclimatic implications of pedogenic ferromagnetic mineral formation in Chinese loess. *Earth and Planetary Science Letters* 114: 385-390.
- Jahn B., Gallet, S. y Han J. 2001. Geochemistry of Xining, Xinfeng and Jixian sections, loess plateau of China: eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 Ka. *Chemical Geology* 178: 71-94.
- Khokhlova, O.S., Voronin, K.V., Malashev, V. Y., Golyeva, A.A. y Khokhlov, A.A. 2001. Soil evolution and accumulation of loess like material in the Chechen depression, Northern Caucasus, Russia. *Quaternary International* 76-77: 103-112.
- Lagroix, F. y Banerjee, S.K. 2002. Paleowind directions from the magnetic fabric of loess in central Alaska. *Earth and Planetary Science Letters* 195: 99-112.
- Liu, X., Shaw, J., Liu, T., Heller, F. y Yuan, B. 1992. Magnetic mineralogy of Chinese Loess and its significance. *Quaternary Research* 42: 162-165.
- Liu, X., Rolph, T., Bloemendal, J., Shaw, J. y Liu, T.S. 1995. Quantitative estimates of paleoprecipitation at Xinfeng, in the Loess Plateau of China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 13: 243-248.
- Liu, Q., Banerjee, S.K., Jackson, M., Chen, F., Pan, Y. y Zhu, R. 2004. Determining the climatic boundary between the Chinese loess and paleosol: evidence from aeolian coarse-grained magnetite. *Geophysical Journal International* 156: 267-274.
- Maher, B. y Taylor, R. 1988. Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. *Nature* 336: 368-379.
- Maher, B. 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 137, 25-54.
- Maher, B. y Thompson, R. 1994. Pedogenesis and paleoclimate. Interpretation of the magnetic susceptibility record of Chinese loess-paleosol sequences. *Geology* 22: 857-859.
- Maher, B.A. y Thompson R. (eds.) 1999. *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Cambridge University Press, 390 p., Cambridge.
- Maher, B.A., Alekseev, A. y Alekseeva, T. 2003. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 201: 321-341.
- Muhs, D.R. y Bettis III, E.A. 2000. Geochemical variation in Peoria loess of western Iowa indicate Last Glacial paleowinds of mid-continental North America. *Quaternary Research*, 53: 49-61.
- Muhs, D.R., Bettis III, E.A., Been, J. y McGeehin, J.P. 2001. Impact of climate and parent material on chemical weathering in loess-derived soils of the Mississippi river valley. *Division S-5- Pedology*. Soil Science Society of America Journal 65: 1761-1777.
- Muhs, D.R. y Zárate, M. 2001. Late Quaternary eolian records of the Americas and their paleoclimatic significance. En Markgraf, V. (ed.). *Interhemispheric climate linkages* Academic Press, 12: 183-211, San Diego.
- Muhs, D.R., Thomas, T.A., Bettis III, E.A., McGeehin, J., Been, J.M., Begét, J.E., Pavich, M.J., Stafford Jr, T.W. y Stevens, A.A.S.P. 2003. Stratigraphy and paleoclimatic inference of late Quaternary loess-paleosol sequences of Last Interglacial - Glacial cycle in central Alaska. *Quaternary Science Reviews* 22: 1947-1986.
- Muhs, D.R., McGeehin, J.P., Beann J. y Fisher, E. 2004. Holocene loess deposition and soil formation as competing processes Matanuska valley, Southern Alaska. *Quaternary Research* 61: 265-276.
- Nicolli, H.B., Tineo, A., García, J.W., Falcón, C. M., Merino, M.H., Etchechurry, M.C., Alonso, M.S. y Tófaló, O.R. 2004. The role of loess in groundwater at salí River Basin, Argentina. En Wanty, R.W. y Seal II, R.R. (eds.) *Water-rock interaction*, Balkema Publishers 2: 1591-1595, London.
- Oches, E. y Banerjee, S.K. 1996. Rock magnetic proxies of climate change from loess-paleosols sediments of the Czech republic. *Studia Geophysica et Geodetica* 40(3): 287-300.
- Orgeira, M.J. y Compagnucci, R. 2006. Correlation between paleosol-soil magnetic signal and climate. *Earth, Planets and Space, Special Issue Paleomagnetism and Tectonics in Latinamerica*, 58(10): 1373-1380.
- Orgeira, M.J., Pereyra, F.X., Vásquez, C., Castañeda, E. y Compagnucci, R. 2008. Environmental magnetism in present soils, Buenos Aires province, Argentina. *Journal of South American Earth Science* 26: 217-224
- Panaiotu, C.G., Panaiotu, E.C., Grama, A. y Necula, C. 2001. Paleoclimatic record from a loess-paleosol profile in southeastern Romania. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth y Geodesy, Elsevier Science* 26(11): 893-898.
- Smith, J., Vance, D., Kemp, R.A., Archer, C., Toms, P., King, M. y Zárate, M. 2003. Isotopic constraints on the source of Argentinian loess- with implications for atmospheric circulation and the provenance of Antarctic dust during recent Glacial maxima. *Earth and Planetary Science Letters* 212: 181-196.
- Teruggi, M.E. 1957. The nature and origin of the Argentinian loess. *Journal of Sedimentary Petrology* 27(3): 322-332.
- Teruggi, M.E., Etchechury, M.C. y Remiro, J.R. 1957. Estudio sedimentológico de los terrenos de las Barrancas de la zona Mar del Plata-Miramar. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia* 4(2): 167-250.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographic Review* 38: 55-94
- Tofalo, O.R., Orgeira, M.J., Ramos, A. y Alonso, S. 2008. Sucesión sedimento-pedológica del Cenozoico tardío, Zárate, (Buenos Aires). Registro continental del MSI 5 e intervalos interglaciares más antiguos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(3): 430-441.
- Zárate, M. y Blasi, A. 1993. Late Pleistocene-Holocene Aeolian deposits of the southern Buenos Aires Province, Argentina.: a preliminary model. *Quaternary International* 17: 15-20.
- Zhu, L.P., Matasova, G., Kazansky, A., Zykina, V. y Sun, M. 2003. Rock magnetic record of the last glacial-interglacial cycle from the Kurtak loess section, southern Siberia. *Geophysical Journal International* 152: 335-343.

Recibido: 17 de enero, 2009

Aceptado: 29 de octubre, 2009