



## Caracterização magnética de solos dos sítios arqueológicos Alice de Boer e Lagoa do Camargo, Rio Claro, São Paulo

Victor Jorge de Oliveira Marum (Universidade Católica de Santos); Gelvam André Hartmann (Universidade Estadual de Campinas); Astolfo Gomes de Mello Araujo (Universidade de São Paulo); Ricardo Ivan Ferreira da Trindade (Universidade de São Paulo)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Resumo

A utilização das propriedades magnéticas em solos arqueológicos permite a obtenção de informações sobre as atividades antrópicas no passado. Neste trabalho foram realizadas medidas magnéticas nos sítios arqueológicos Alice de Boer e Lagoa do Camargo, ambos localizados no município de Rio Claro, São Paulo. Os resultados indicaram a presença de mineralogia superparamagnética em certas profundidades em ambos os sítios, o que pode ser indicativo da ocorrência de paleofogueiras.

### Introdução

As propriedades magnéticas em solos arqueológicos fornecem importantes informações sobre as atividades humanas pretéritas (e.g. Dalan e Banerjee, 1996; 1998; Evans e Heller, 2003). O registro magnético de origem antrópica se dá pela deposição e/ou alteração dos minerais magnéticos presentes nos solos. Apesar dos minerais magnéticos apresentarem baixa concentração nos solos (geralmente inferior a 1% da massa total), eles são responsáveis pelas diferentes colorações e pelas propriedades magnéticas de muitos tipos de solos (Evans e Heller, 2003; Linford, 2005). Os minerais magnéticos são bastante sensíveis às mudanças ambientais, determinadas através de mecanismos de oxidação e de redução. A sensibilidade dos minerais magnéticos às mudanças ambientais é observada desde escalas regionais, como nos registros de paleotemperatura e de paleoprecipitação (Maher, 1998), até escalas microscópicas, como no caso das bactérias magnéticas presentes nos solos (Fassbinder et al., 1990). Embora essas alterações possam ocorrer como parte da pedogênese natural, é evidente que a atividade antropogênica (atual e antiga) também proporciona alterações em escalas locais e regionais, que são refletidas pela variação na concentração e no tipo de minerais magnéticos nos solos (e.g. Evans e Heller, 2003). As alterações magnéticas em horizontes de solos e sedimentos que formam o registro arqueológico são os "fingerprints" magnéticos deixados pela ação do homem

no registro geológico (Dalan e Banerjee, 1996; 1998; Evans e Heller, 2003).

As técnicas de magnetismo de solos são aplicadas em diferentes tipos de problemas arqueológicos. As variações de parâmetros magnéticos em perfis de solos arqueológicos permitem a correlação com outros tipos de informações arqueológicas. A principal aplicação é a comparação com levantamentos geofísicos de sítios arqueológicos para correlação espacial de materiais de origem antrópica. Há, no entanto, outras aplicações. Por exemplo, uma das assinaturas magnéticas mais comuns em solos arqueológicos é o aumento abrupto da susceptibilidade magnética (até 100 vezes) devido à queima de matéria orgânica, comum em solos arqueológicos (e.g. Evans e Heller, 2003). Outro tipo de aplicação é em estudos de transformação da paisagem devido a fatores naturais e culturais. Neste contexto, vários tópicos podem ser abordados a partir das técnicas magnéticas, incluindo: (a) definição dos limites e das diferentes áreas de atividade de sítios arqueológicos; (b) investigação da morfologia ou função de sítios, além de feições e processos responsáveis pela formação desses sítios; (c) compreensão de processos de erosão e sedimentação em relação ao registro arqueológico; (d) construção e correlação de sucessões estratigráficas de sítios arqueológicos; (e) fornecimento de dados paleoambientais e outras informações acerca de formação de solos em contextos arqueológicos (Dalan e Banerjee, 1998; Evans e Heller, 2003).

Neste trabalho são apresentados os resultados de diferentes parâmetros magnéticos obtidos em dois perfis de solos dos sítios arqueológicos Alice de Boer e Lagoa do Camargo, ambos localizados em Rio Claro, São Paulo.

### Amostragem e Metodologias

A região de Rio Claro compreende vários municípios na porção central do Estado de São Paulo e pode ser considerada como uma das mais importantes regiões para os estudos de arqueologia no Brasil, devido à riqueza de seu registro arqueológico (Araújo, 2001).

Alice de Boer é um sítio arqueológico, situado no município de Rio Claro, foi descoberto pela prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Beltrão na década de 1960 e pode ser considerado como o mais antigo sítio arqueológico do Estado de São Paulo (Araújo, 2001). Beltrão (1984) explica que esse sítio situa-se em um terraço fluvial de várzea e, curiosamente, foi utilizado para determinar a orientação

geográfica de um “corredor migratório” pleistocênico. Deste sítio foram coletadas 19 amostras de solo entre as profundidades de 257,8 e 424,1 cm do perfil estudado.

O sítio arqueológico Lagoa do Camargo, também localizado no município de Rio Claro, sobre os sedimentos da Formação Corumbataí e Formação Rio Claro, é composto de rochas sedimentares e vulcânicas das eras Paleozóica, Mesozóica e Cenozóica. Geologicamente, está contida na Bacia Sedimentar do Paraná (Zaine, 1996). Deste sítio foram coletadas 20 amostras de solo entre as profundidades de 35,3 e 225,6 cm do perfil estudado.

As análises magnéticas dos dois sítios estudados foram realizadas no Laboratório de Paleomagnetismo do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USPMag) e a análise dos dados foi efetuada no Laboratório de Geofísica Aplicada à Exploração de Petróleo (LGAEP) da Universidade Católica de Santos. As análises incluem medidas de susceptibilidade magnética, magnetização remanente anisterética, magnetização remanente isotérmica e curvas de histerese.

Medidas de susceptibilidade magnética foram efetuadas em 2 frequências distintas ( $F_1 = 976$  Hz e  $F_3 = 15616$  Hz) com um campo aplicado de 200 A/m; a partir das medidas das duas frequências foi calculado o parâmetro  $\chi_{fd}$  (%), que indica a relação entre a susceptibilidade magnética nas duas frequências. A magnetização remanente anisterética (ARM) foi determinada pela aplicação de um campo direto (DC) de 50 mT e desmagnetizada em campos magnéticos alternados (AF), nos passos de 1.5, 3, 4.5, 6, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90 mT. A magnetização remanente isotérmica (IRM) foi adquirida em campos pulsados de 100 mT (IRM100mT) e de 1000 mT (IRM1000mT) no sentido “positivo”, e de outro pulso de 300 mT no sentido “negativo” (-300 mT) (IRM-300mT). A partir dessas medidas foram calculadas a razão S (S-ratio) (S-ratio =  $[IRM-300mT/IRM1000mT]$ ) e a razão HIRM (“hard” IRM) (HIRM =  $[IRM1000mT + IRM-300mT] / 2$ ), que são parâmetros que indicam a contribuição de minerais com baixa coercividade magnética e alta coercividade magnética, respectivamente. Curvas de histerese foram obtidas em todas as amostras dos sítios estudados. As medidas foram feitas em campos de até 1 T para obtenção da magnetização remanente de saturação (Mrs), cujos valores mais altos estão associados à presença de magnetita (superparamagnética ou ferrimagnética).

## Resultados e Discussão

As Figuras 1 e 2 mostram os perfis dos sítios Alice de Boer e Lagoa do Camargo, respectivamente. Os perfis apresentam os valores de susceptibilidade magnética ( $\chi$ ) medidos na frequência 1 ( $F_1 = 976$  Hz) em  $m^3/kg$ ,  $\chi_{fd}$  (%), S-ratio, HIRM,  $B_{1/2}$  em mT, DP e Mrs em  $Am^2/kg$ , em função da profundidade. A Figura 1 mostra os dados para o Sítio Alice de Boer, cujos valores de profundidade são expressos em centímetros (acima do rio) de onde

cada amostra foi coletada. Isso significa que a amostra mais profunda encontra-se a 277,8 cm. Os valores de susceptibilidade magnética medidos em  $F_1$  variaram de  $3,31 \times 10^{-7}$  a  $1,45 \times 10^{-6}$   $m^3/kg$ , do parâmetro  $\chi_{fd}$  de 10,4 a 17,0 %, da S-ratio de 0,846 a 0,979, da razão HIRM de  $4,17 \times 10^{-2}$  a  $1,41 \times 10^{-1}$ , do  $B_{1/2}$  de 14,79 a 18,20 mT, do DP de 0,25 a 0,29 e da Mrs de  $1,07 \times 10^{-3}$  a  $9,51 \times 10^{-3}$   $Am^2/kg$ .

Para o Sítio Lagoa do Camargo, os valores de susceptibilidade magnética medidos em  $F_1$  variaram de  $6,14 \times 10^{-7}$  a  $6,76 \times 10^{-6}$   $m^3/kg$ , do parâmetro  $\chi_{fd}$  de 3,6 a 5,3 %, da S-ratio de 1,038 a 1,056, da razão HIRM de  $6,03 \times 10^{-7}$  a  $6,60 \times 10^{-7}$ , do  $B_{1/2}$  de 8,91 a 9,77 mT, do DP de 0,29 a 0,33 e da Mrs de  $2,04 \times 10^{-3}$  a  $3,16 \times 10^{-3}$   $Am^2/kg$  (Figura 2).

No sítio Alice de Boer, os valores da S-ratio e da razão HIRM diminuem com a profundidade, enquanto que no sítio Lagoa do Camargo esses dois parâmetros aumentam com a profundidade. Para os dois sítios, o parâmetro DP apresenta valores máximos e mínimos ao longo de todo o perfil e os valores mais altos do  $B_{1/2}$ , em geral, encontram-se nas porções mais inferiores dos perfis.

A susceptibilidade magnética foi medida pela aplicação de campos magnéticos em duas frequências distintas a fim de determinar a contribuição superpara- e ferromagnética dos minerais magnéticos. Isso acontece porque os minerais superparamagnéticos são sensíveis à variação de frequência do campo magnético, logo, a variação nos valores observados para a susceptibilidade magnética em frequências diferentes é um indicativo desse tipo de mineralogia magnética. Em contrapartida, minerais ferromagnéticos apresentam valores similares de susceptibilidade magnética medida em diferentes frequências de campo aplicado. Os intervalos da amostragem que apresentam altos valores do parâmetro  $\chi_{fd}$  são indicativos da presença de minerais superparamagnéticos. Evans e Heller (2003) indicam que altos valores do parâmetro  $\chi_{fd}$  são também indicativos de ações antrópicas pretéritas (utilização de paleofogueiras, por exemplo), que resultam na origem de minerais superparamagnéticos em vez de ferromagnéticos.

Na Figura 1, os altos valores encontrados para o parâmetro  $\chi_{fd}$  indicam a presença de grande quantidade de minerais superparamagnéticos na porção mais profunda da amostragem do Sítio Alice de Boer. O aumento que os valores da S-ratio, da razão HIRM e do  $B_{1/2}$  apresentaram nas porções rasas da amostragem indica que nessas porções há presença de mineralogia magnética de baixa coercividade, como magnetita, por exemplo. Os altos valores da Mrs nas porções mais rasas também indicam que a mineralogia de baixa coercividade magnética está presente em maiores quantidades.

A Figura 2 indica que a mineralogia superparamagnética está mais presente nas porções mais profundas na amostragem do Sítio Lagoa do Camargo, devido aos valores mais altos do parâmetro  $\chi_{fd}$ . Os altos valores da S-ratio, da razão HIRM, do  $B_{1/2}$  e do DP são indicativos da presença de minerais de baixa coercividade magnética também nas porções mais profundas da amostragem. Os altos valores da Mrs

indicam que os minerais de baixa coercividade também encontram-se nas porções mais profundas desse perfil.

Os resultados determinados neste trabalho indicam que a aplicação das técnicas magnéticas pode ser utilizada como uma importante ferramenta para determinação da ação antrópica em perfis de sítios arqueológicos. A utilização de vários parâmetros magnéticos em perfis de solos dos sítios Alice de Boer e Lagoa do Camargo indica a presença de alteração da mineralogia magnética em certas profundidades. Essas variações sugerem a influência antrópica (provavelmente devido a paleofogueiras) nestes perfis estudados.

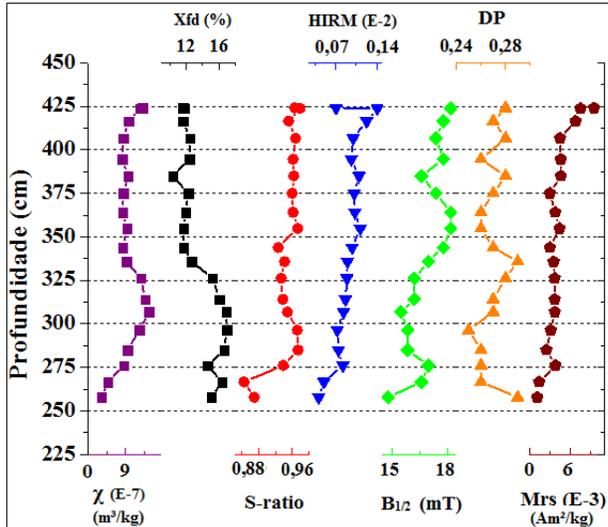


Figura 1 – Perfil do sítio arqueológico Alice de Boer.

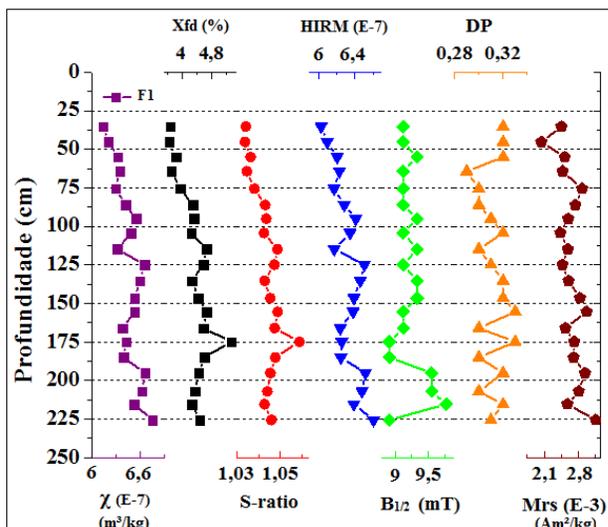


Figura 2 – Perfil do sítio arqueológico Lagoa do Camargo.

## Agradecimentos

V. J. O. M. agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Científica (Processo: 134971/2015-9), ao Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas (IPECI) da Universidade Católica de Santos, e ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP).

A. G. M. A. agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processo: 2009/54720-9 e 2014/13794-5) e ao CNPq (processos: 302670/2015-7 e 442948/2015-8).

## Referências

- Araújo, A. Arqueologia da região de Rio Claro: uma síntese. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia* 11, n. 11, p. 125-140, 2001.
- Beltrão, M.; Toth, E.; Neme, S. Perspectivas Arqueológicas do Projeto Central – Nota Prévia. *Revista do Curso de Mestrado em História*, 1984.
- Dalan, R.; Banerjee, S. Soil magnetism, archaeological landscapes. *Geophysical Research Letters*, vol. 23, n. 2, p. 185-188, 1996.
- Dalan, R.; Banerjee, S. Solving archaeological problems using techniques of soil magnetism. *Geoarchaeology*, vol. 13, n. 1, p. 3-36, 1998.
- Evans, M.; Heller, F. *Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics*. Academic Press, vol. 86, 2003.
- Fassbinder, J.; Stanjek, H.; Vali, H. Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature*, v. 343, n. 6254, p. 161, 1990.
- Linford, N. Archaeological applications of naturally occurring nanomagnets. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 17, p.127, 2005.
- Maher, B.; Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 137, p. 25-54, 1998.
- Zaine, M. Patrimônios naturais e história geológica da região de Rio Claro-SP. *Arquivo Público e Histórico*, Rio Claro, 1996.