



O REGISTRO DA VARIAÇÃO SECULAR GEOMAGNÉTICA EM UM ESPELEOTEMA DO CENTRO-OESTE DO BRASIL: RESULTADOS PRELIMINARES

Plinio Jaqueto*¹, Gelvam A. Hartmann¹, Ricardo I. F. Trindade¹, Valdir F. Novello²,
Francisco W. daCruz²

¹ Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas,
Universidade de São Paulo. Rua do Matão, 1226, 05508-090, São Paulo, SP, Brasil.

² Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562, 05508-080,
São Paulo, SP, Brasil.

ABSTRACT

The Earth's magnetic field (EMF) varies on different timescales, from milliseconds to millions of years. The variation of important geomagnetic anomalies, such as South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA), could be described through data and also the field models for the past millennia. It is known that South America contributes with less than 3% of the global database and some of these data (obtained decades ago) do not obey minimum quality criteria. In this sense, continuous records from direction (declination and inclination) and intensity provide high-resolution data on spatial and temporal behavior of EMF. Here, we present results of magnetic inclination determined from a stalagmite collected in Pau d'Alho cave (14.8° S, 56.4° W), located in Rosario do Oeste, MatoGrosso, Brazil. The chronology ranges from 500 AD to 1900 AD based on the U-Th dating and it has a constant growth rate of ~ 0.15 mm/yr. Measurements of the stalagmite were performed continuously using a SQUID magnetometer. Magnetic values for each measured point were deconvolved by using the singular value decomposition (SVD) method. Magnetic mineralogy indicates the presence of magnetite throughout the stalagmite. We found that the magnetic inclination values from the stalagmite are similar to those predicted by the geomagnetic field models, suggesting that speleothems are an important recorder for continuous determination of the geomagnetic field.

Keywords: Speleothem, Paleomagnetism, Geomagnetic secular variation.

RESUMO

O campo magnético terrestre (CMT) oscila em diferentes escalas de tempo, que vão de milissegundos até milhões de anos. As variações de anomalias importantes do CMT, como a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (do inglês, SAMA), podem ser descritas através dos dados e também dos modelos de campo para os últimos milênios. A América do Sul contribui com menos de 3% da base dados mundial e alguns desses dados (obtidos há mais de duas décadas) não obedecem aos critérios mínimos de qualidade utilizados atualmente. Nesse sentido, registros contínuos de direção (declinação e inclinação) e intensidade podem fornecer dados de alta resolução temporal e espacial sobre o comportamento do CMT. Neste trabalho serão apresentados resultados de inclinação magnética determinadas para uma estalagmite da Caverna Pau d'Alho (14.8° S, 56.4° W), município de Rosário do Oeste, Mato Grosso, Brasil. A estalagmite apresenta idades U-Th que variam de 500 AD até 1900 AD, com uma taxa de crescimento de ~ 0.15mm/ano. As medidas de magnetização foram feitas pelo modo contínuo usando um magnetômetro SQUID. Os valores de magnetização para cada ponto de medida foram determinados pelo método de decomposição por valores singulares (SVD). A mineralogia magnética ao longo de toda a estalagmite indica a presença de magnetita. Os resultados de inclinação determinados para a estalagmite indicam valores que são semelhantes àqueles previstos pelos modelos de campo, sugerindo que os espeleotemas são alvos importantes para determinação de registros contínuos do campo geomagnético.

Palavras chave: Espeleotema, paleomagnetismo, variação secular geomagnética.



Introdução

O campo magnético terrestre (CMT) oscila em diferentes escalas de tempo, que vão de milissegundos até bilhões de anos (*e.g.* Merrill *et al.*, 1998; Hulot *et al.*, 2010). As variações rápidas são devidas aos processos que ocorrem na magnetosfera e ionosfera e as variações lentas ocorrem devido aos processos de geração do CMT no núcleo externo da Terra (o chamado *geodínamo*). Informações sobre o geodínamo podem somente ser acessadas através de medidas feitas na superfície ou acima dela, que podem ser diretas ou indiretas. As medidas diretas incluem dados dos navegadores, observatórios magnéticos e satélites, enquanto que medidas indiretas incluem materiais arqueológicos (cerâmicas, tijolos, telhas, solos queimados, etc.) e materiais geológicos (sedimentos, rochas ígneas, sedimentares, etc.).

A integração de diferentes fontes de dados permite estudar importantes fenômenos da evolução do CMT. Enquanto que as excursões e as reversões do CMT são fenômenos que ocorrem em escalas de centenas de milhares até milhões de anos, as variações que ocorrem em escalas de séculos a milênios são fundamentais na descrição de oscilações de “alta frequência” do geodínamo (*e.g.* Hulot *et al.*, 2010). As variações de anomalias importantes do CMT, como a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (do inglês, SAMA), podem ser descritas através dos dados e também dos modelos de campo para os últimos milênios. A SAMA é caracterizada pelas mais baixas intensidades do CMT observadas em todo o globo para faixas de mesma latitude, se estendendo atualmente do Sul da África até a América do Sul (*e.g.* Bloxham, Gubbins, 1985; Olson, Amit, 2006; Hartmann, Pacca, 2009). A origem da SAMA é creditada a processos de convecção anômala do fluido eletricamente condutor no núcleo externo da Terra (*e.g.* Olson, Amit, 2006). A evolução da SAMA pode ser determinada a partir da análise dos dados e dos modelos de campo para os últimos séculos e milênios (*e.g.* Olson, Amit, 2006; Hartmann, Pacca, 2009; Korte *et al.*, 2009). Os modelos recentemente desenvolvidos para os últimos 3.000 anos (Korte, Constable, 2011) integram diferentes bases de dados espalhados pelo mundo. Embora os modelos apresentem a possibilidade de estudar o CMT continuamente no tempo, a distribuição de dados usados para o desenvolvimento desses modelos é bastante heterogênea ao redor do globo, sendo que o Hemisfério Sul contribui com cerca de 5% da base de dados mundial (Genevey *et al.*, 2008; Donadini *et al.*, 2009). A América do Sul contribui com menos de 3% da base de dados mundial e alguns desses dados (obtidos há mais de duas décadas) não obedecem aos critérios mínimos de qualidade utilizados atualmente, entre outros fatores por não apresentar correções magnéticas e critérios mais rígidos na determinação das idades das amostras. Esta discrepância na quantidade e qualidade dos dados entre os dois hemisférios é um fator limitante ao desenvolvimento dos modelos que traçam a evolução do campo, conseqüentemente, no avanço do conhecimento dos processos de geração do campo durante o período dos últimos milênios.

Devido à escassez de dados para a América do Sul, os modelos globais indicam curvas “suavizadas” das variações do campo geomagnético regional. Nesse sentido, registros contínuos de direção (declinação e inclinação) e intensidade podem fornecer dados de alta resolução temporal e espacial sobre o comportamento do CMT. Recentemente, Lascu, Feinberg (2011) indicaram o potencial dos espeleotemas como arquivos de alta fidelidade para o campo antigo. Além disso, avanços na sensibilidade dos magnetômetros (por exemplo, magnetômetros supercondutores) e datações mais precisas (por exemplo, datações U-Th) permitem que variações do campo em escalas de séculos a milênios sejam determinadas em estalagmites. Como parte desse esforço será apresentada resultados de inclinação magnética determinadas para uma estalagmite (Figura 1a) da Caverna Pau d’Alho (14.8° S, 56.4° W), município de Rosário do Oeste, Mato Grosso, Brasil. A estalagmite apresenta idades que variam de 500 AD até 1900 AD.

Metodologias

A estalagmite da Caverna Pau d’Alho (ALHO6) foi datada através do método U-Th através da técnica de espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) (Cheng *et al.*, 2009). As datações foram feitas no laboratório de geocronologia do Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade de Minnesota, nos Estados Unidos. Foram determinadas 14 datações ao longo de 24 cm. de comprimento

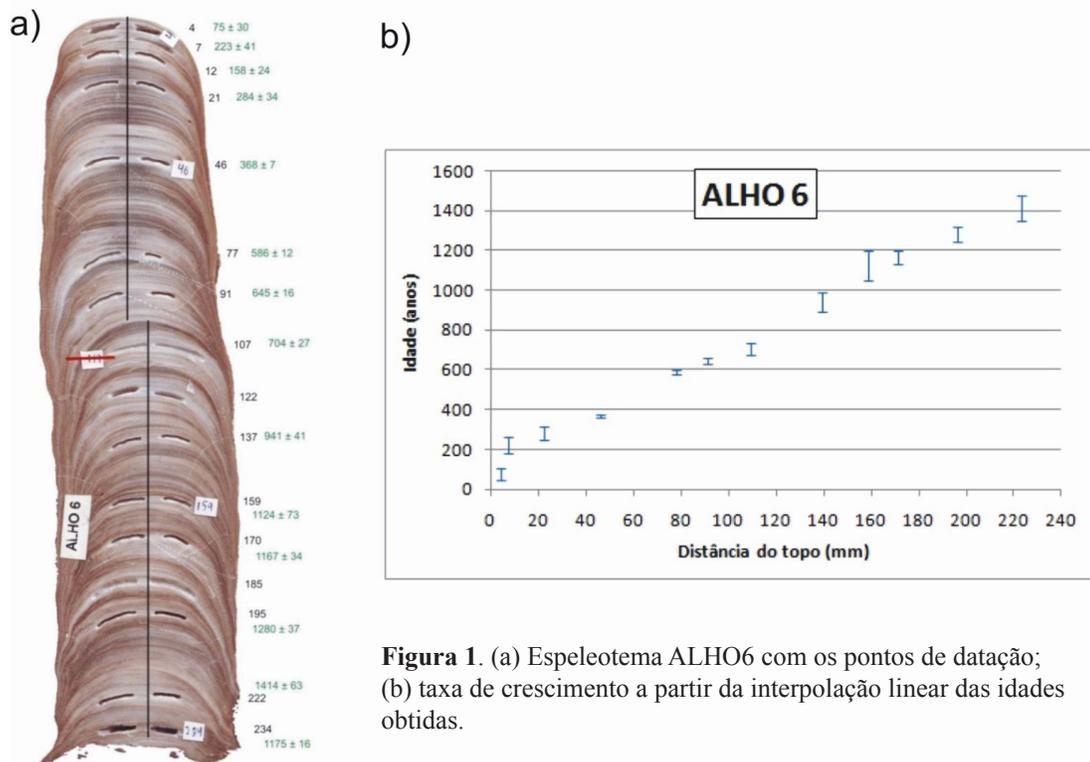


Figura 1. (a) Espeleotema ALHO6 com os pontos de datação; (b) taxa de crescimento a partir da interpolação linear das idades obtidas.

da estalagmite. As taxas de crescimento foram estimadas a partir da interpolação linear entre as idades determinadas e seus respectivos erros (Figura 1b), fornecendo uma taxa de crescimento constante de $\sim 0.15\text{mm/ano}$. A linearidade de crescimento da ALHO6 permite o estudo contínuo do campo geomagnético. Uma das técnicas de medidas de espeleotemas em um magnetômetro tipo SQUID envolve a medida contínua que, por sua vez, pode evitar eventuais perdas de níveis estratigráficos com o cortes de amostras discretas em tamanho padrão (*e.g.* 2.2 cm de altura). Entretanto, o limite para as medidas está na resolução espacial do equipamento indicada por sua função resposta dos sensores SQUID. Neste trabalho, as amostras foram medidas no modo contínuo do magnetômetro tipo U-channel da 2G Enterprises. As medidas de magnetização foram efetuadas a cada 0.5cm, permitindo uma resolução temporal média de ~ 30 anos. As direções do vetor magnetização da ALHO6 foram determinadas pela desmagnetização progressiva em campos magnéticos alternados (AF) e em passos sucessivos até 1500 mT. Os valores escalares da magnetização para cada passo de desmagnetização foram determinados a partir da deconvolução do sinal obtido, que é a soma da magnetização com a função resposta dos três SQUIDS (X, Y, Z). Neste trabalho foi adotado o método de decomposição por valores singulares (SVD) para se obter o valor de magnetização para cada um dos pontos de medida (Jackson *et al.*, 2010). Para o cálculo das componentes de magnetização foi utilizada análise por componentes principais (PCA) (Kirschvink, 1980), porém apenas o dado de inclinação pôde ser utilizado uma vez que a estalagmite não foi orientada pela declinação.

A mineralogia magnética da ALHO6 foi determinada a partir de medidas de magnetização em campos altos em temperatura ambiente e em baixas temperaturas. Para determinação dos portadores magnéticos foram preparadas 23 amostras em pó a cada centímetro. Ciclos de histerese foram efetuados em 23 amostras para campos de até 1 T, utilizando o equipamento *Alternating Gradient Magnetometer* (AGM) da *Princeton Measurements*. *First Order Reversal Curves* (FORC) (Pike *et al.*, 1999; Roberts *et al.*, 2000) foram feitas em campos de até 1 T com intervalos de 1.6mT, utilizando o AGM. Medidas de magnetização em baixas temperaturas foram realizadas com o objetivo de determinar as transições magnéticas características dos



minerais magnéticos, como a transição de Verwey (~120 K) para a magnetita ou a transição de Morin (~260 K) para a hematita. As medidas em baixas temperaturas foram efetuadas entre as temperaturas de 300 K a 10 K em ciclos de resfriamento e aquecimento e utilizando o *Magnetic Property Measurement System* (MPMS) da *Quantum Design*.

Resultados

A mineralogia magnética observada na ALHO6, de modo geral, foi constante ao longo de toda a estalagmite. A Figura 2a mostra um exemplo típico de curva de histerese (amostra em profundidades de 7.5cm e 13.8cm em relação ao topo da estalagmite), indicando um mineral com uma contribuição diamagnética maior que a ferromagnética. Após a remoção da componente diamagnética, a componente restante ferromagnética mostra um mineral de baixa coercividade, provavelmente magnetita. O diagrama FORC (fig. 2b) foi determinado após o empilhamento de cinco aquisições independentes, conforme descrito por Heslop, Roberts (2012). Os resultados dos FORCs indicam a presença de minerais de baixa coercividade, com valores típicos de magnetita de domínio simples. Os resultados de magnetização em baixas temperaturas indicaram um comportamento constante ao longo de toda a ALHO6. A Figura 3 (amostras em profundidades de 7.5cm e 13.8cm) mostra um exemplo típico, onde a curva de resfriamento indica uma diminuição da magnetização remanente em temperaturas ao redor de 120K (fig. 2B), indicando a presença de magnetita parcialmente oxidada (e.g. Özdemir *et al.*, 1993).

Os resultados de magnetização em modo contínuo foram determinados após a deconvolução SVD (Jackson *et al.*, 2010). A Figura 4a mostra os resultados das medidas de magnetização em função da posição antes

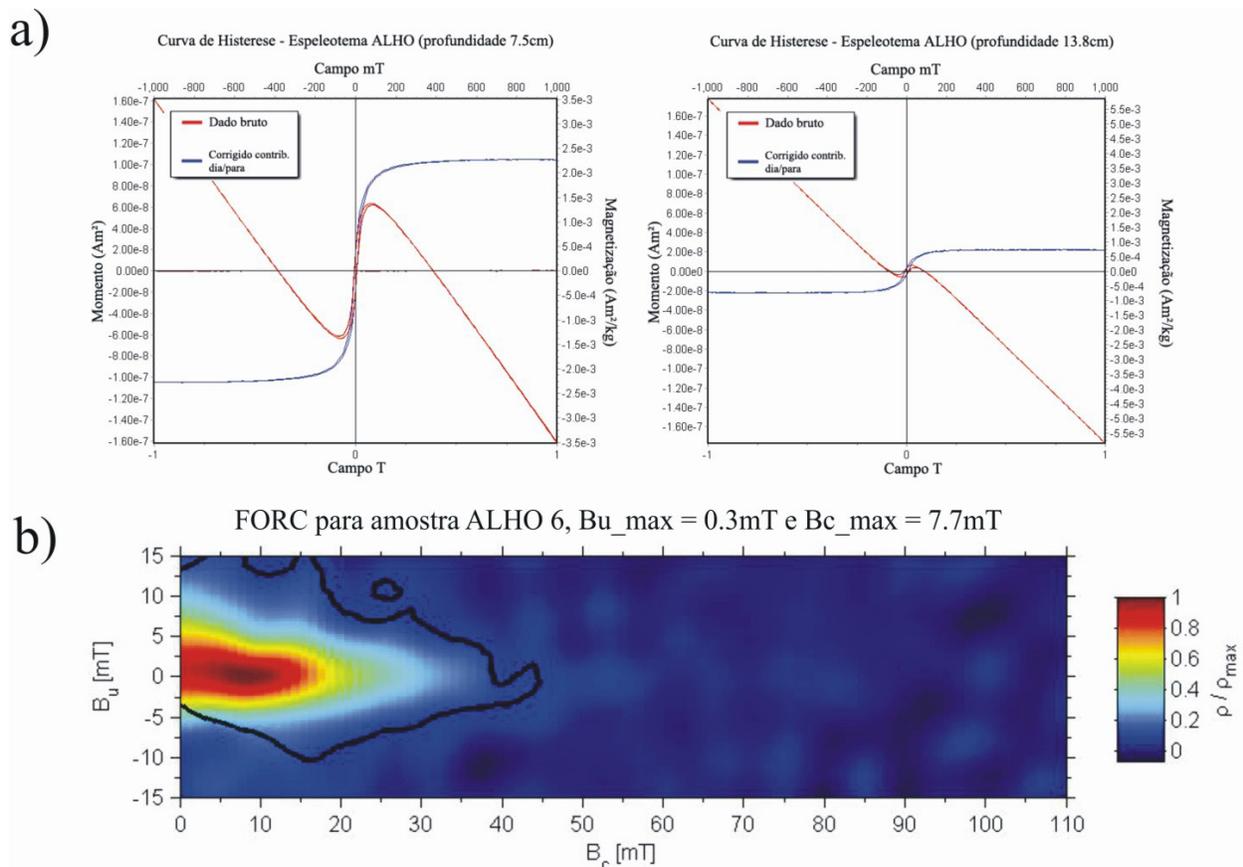


Figura 2. (a) Curvas de histerese obtidas com o AGM para as profundidades 7.5 cm e 13.8 cm; (b) Digrama do tipo FORC para profundidade de 20cm com empilhamento de 5 medições.

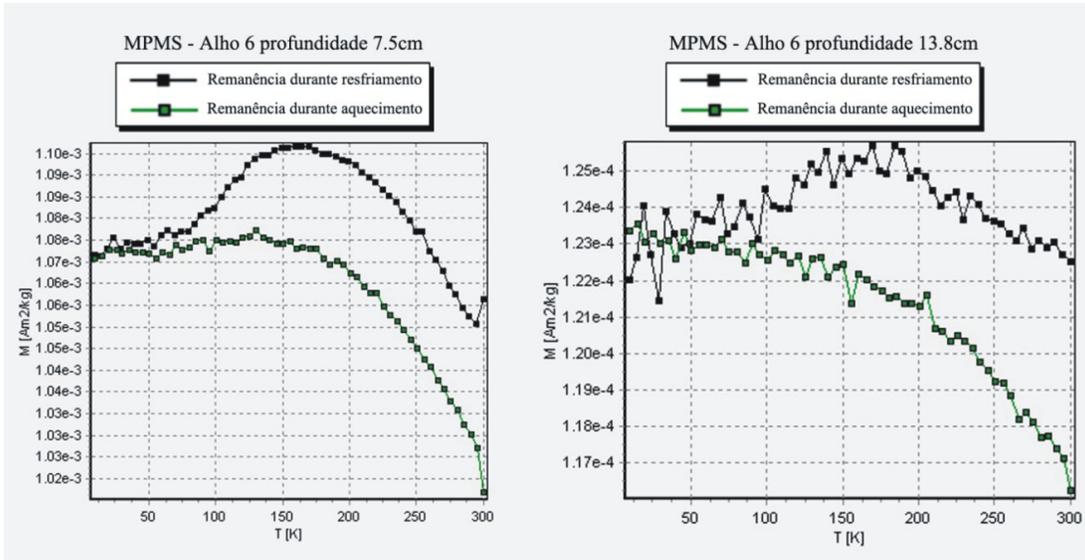


Figura 3. Medidas de mineralogia magnética com o MPMS com curvas de baixa temperatura (0-300K), curvas típicas de magnetita parcialmente oxidada.

e após a deconvolução. As linhas tracejadas representam os valores medidos de magnetização remanescente e as linhas contínuas o resultado da deconvolução para a magnetização remanescente natural (NRM). Após a deconvolução, muitas feições são identificadas para cada passo de desmagnetização (fig. 4a) possibilitando a análise vetorial da magnetização a cada 0.5cm. A Figura 4b mostra diagramas ortogonais e curvas de intensidade de magnetização para duas amostras representativas da ALHO6 (profundidades 0.75 cm e 10.25 cm). As duas amostras foram completamente desmagnetizadas, o que possibilitou a determinação com confiança da inclinação magnética. Uma direção de magnetização coerente foi observada ao longo de toda a ALHO6, indicando a possibilidade de descrição contínua para inclinação do campo geomagnético entre ~ 500 AD e ~ 1900 AD.

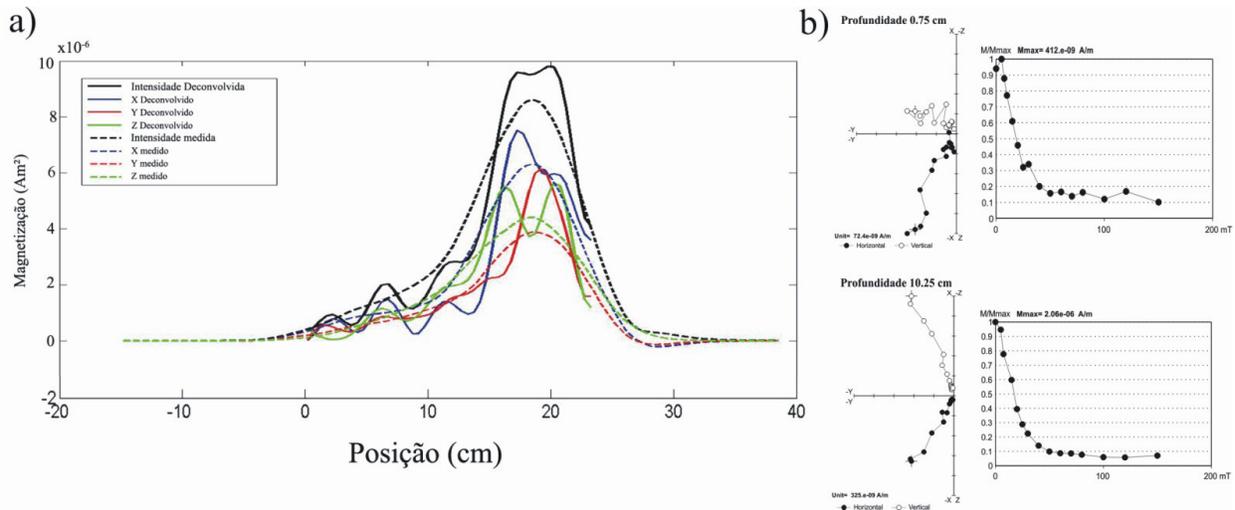
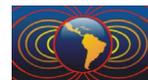


Figura 4. (a) Resultado após a deconvolução da magnetização remanescente natural, linhas pontilhadas indicam os dados brutos e linhas contínuas para o dado deconvolvido. (b) Diagramas ortogonais após a deconvolução de todos os passos de desmagnetização para as profundidades 0.75cm e 10.25cm respectivamente.



Discussão e conclusões

A Figura 5a mostra os resultados de inclinação magnética e os respectivos erros determinados para cada intervalo de 0.5 cm ao longo de toda a ALHO6. Os resultados são comparados com os modelos de campo geomagnético determinados por Korte *et al.* (2009). Os valores de desvio de ângulo máximo (MAD) (fig. 5) são, de modo geral, mais elevados para o intervalo de 1650 AD a 1850 AD porque o gradiente de inclinação é alto e os valores de magnetização são baixos em comparação com os valores dos outros pontos. Contudo, os resultados de inclinação determinados na ALHO6 indicam valores que são semelhantes àqueles previstos pelos modelos de campo, sugerindo que os espeleotemas são alvos importantes para determinação contínua do campo geomagnético.

Os resultados de inclinação mostram fortes gradientes ao longo de toda a ALHO6 (fig. 5). As variações de inclinação magnética na porção Oeste do Brasil são indicativas que o campo geomagnético apresenta um comportamento oscilatório em intervalos que variam de 200 a 300 anos. Esse comportamento oscilatório pode estar associado a fenômenos internos profundos da dinâmica do núcleo externo e que podem ser creditados à presença de anomalias do campo, como a SAMA (*e.g.* Olson, Amit, 2006; Hartmann, Pacca, 2009). Contudo, a confirmação de certos padrões de variação secular do campo geomagnético na América do Sul depende da obtenção de dados direcionais e de intensidade em outros setores do continente.

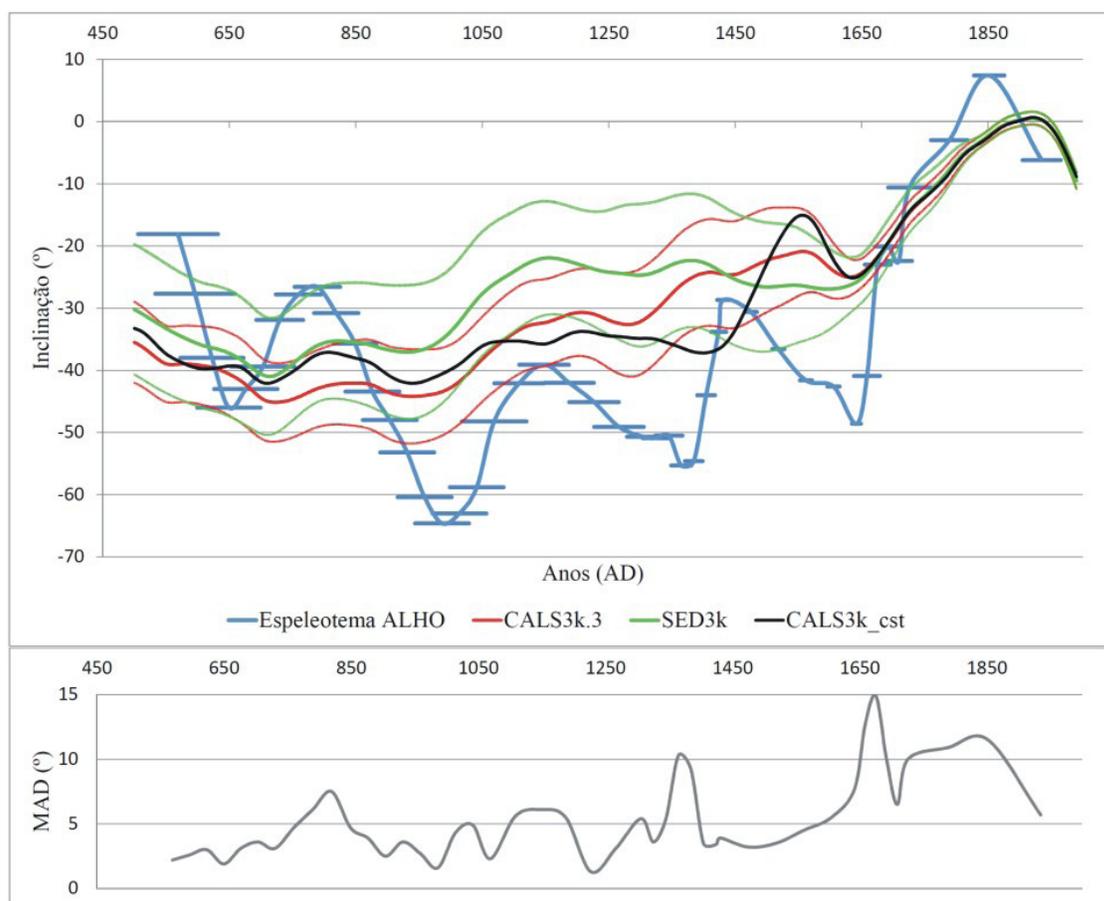


Figura 5. Dados de inclinação obtidos com o espeleotema ALHO 6 (azul) com seus erros de idades (barras horizontais). Modelos CALS3k.3, SED3k com seus erros em linhas mais finas. Desvio angular máximo (MAD) para o espeleotema em cinza.



Bibliografía

- Bloxham, J., Gubbins, D., 1985. The secular variation of the Earth's magnetic field. *Nature*, 317, 777-781. doi: 10.1038/317777a0
- Cheng, H., Fleitmann, D., Edwards, R. L., Wang, X., Cruz, F. W., Auler, A. S., Mangini, A., Wang, Y., Kong, X., Burns, S.J., Matter, A. (2009), Timing and structure of the 8.2 kyr B.P. event inferred from d18O records of stalagmites from China, Oman, and Brazil, *Geology*, 37, 1007–1010, doi:10.1130/G30126A.1.
- Donadini, F., M. Korte, and C. G. Constable, 2009. Geomagnetic field for 0–3 ka: 1. New data sets for global modeling, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 10, Q06007, doi:10.1029/2008GC002295.
- Genevey, A., Gallet, Y., Constable, C. G., Korte, M., Hulot, G., 2008. ArcheoInt: An updated compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennia and its application to the recovery of the past dipole moment. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, 4, Q04038. doi: 10.1029/2007/GC001881
- Hartmann, G. A., Pacca, I. G., 2009. Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, 81, 243-255. doi: 10.1590/S0001-37652009000200010
- Heslop, D., and A. P. Roberts, 2012. Estimation of significance levels and confidence intervals for first-order reversal curve distributions, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13, Q12Z40, doi:10.1029/2012GC004115.
- Hulot, G., Finlay, C. C., Constable, C. G., Olsen, N., Manda, M., 2010. The magnetic field of the planet Earth. *Space Sci. Rev.*, 152, 159-222. doi: 10.1007/s11214-010-9644-0
- Jackson, M., J. A. Bowles, I. Lascu, and P. Solheid (2010), Deconvolution of u channel magnetometer data: Experimental study of accuracy, resolution, and stability of different inversion methods, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q07Y10, doi:10.1029/2009GC002991.
- Kirschvink, J. L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophys. J. Res. Astron. Soc.* 62, 699-718.
- Korte, M., Constable, C. G., 2011. Improving Geomagnetic field Reconstructions for 0 – 3ka. *Phys. Earth Planet. Int.*, 188, 247-259.
- Korte, M., Donadini, F., Constable, C. G., 2009. Geomagnetic field for 0 – 3ka: 2. A new series of time-varying global models. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 6, Q06008. doi: 10.1029/2008GC002297
- Korte, M.; Genevey, A.; Constable, C. G.; Frank, U.; Schnepp, E. (2005): Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 1. A new global data compilation, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems (G3)*, 6, 2, Q02H15.
- Lasclu, I., Feinberg, J. M., 2011. Speleothem magnetism, *Quaternary Science Reviews*, doi:10.1016/j.quascirev.2011.08.004.
- Latham, A. G., Schwarcz, H. P., Ford, D.C., Pearce, G. W., 1979. Paleomagnetism of stalagmite deposits. *Nature* 280, 383-385.
- Merrill, R. T., McElhinny, M.W., McFadden, P. L., 1998. The magnetic field of the Earth: Paleomagnetism, the core, and the deep mantle, Vol. 63 (International Geophysics Series.), Elsevier, Academic Press, Amsterdam.
- Olson, P., Amit, H., 2006. Changes in Earth's dipole, *Naturwissenschaften*, 93, 519-542. doi: 10.1007/s00114-006-0138-6
- Özdemir, O., Dunlop, D. J., Moskowitz, B. M., 1993. The effect of oxidation on the Verwey transition in magnetite, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 1671-1674. doi: 10.1029/93GL01483
- Pike, C. R., Roberts, A. P., Verosub, K. L., 1999. Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first order reversal curves. *J. App. Phys.*, 85, 9, 6660-6667. doi: 10.1063/1.370176
- Roberts, A. P., Pike, C. R., Verosub, K. L., 2000. First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples. *J. Geophys. Res.*, 105, 12, 28461-28475. doi: 10.1029/2000JB900326