



## Magnetoestratigrafia aplicada à datação de eventos climáticos durante o Eoceno e Oligoceno

Jairo Francisco Savian<sup>1</sup>, Ricardo Ivan Ferreira da Trindade<sup>2</sup>, Luigi Jovane<sup>3</sup>, Fabrizio Frontalini<sup>4</sup>, Rodolfo Coccioni<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geologia, Instituto de Geociências (IGEO) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

<sup>2</sup> Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica, e Ciências Atmosféricas (IAG) - Universidade de São Paulo (USP).

<sup>3</sup> Departamento de Oceanografia Física, Instituto Oceanográfico (IO) – Universidade de São Paulo (USP).

<sup>4</sup> Dipartimento di Scienze dell'Uomo, dell'Ambiente e della Natura - Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo", Urbino, Italy.

Copyright 2014, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

### Resumo

O intervalo que compreende o Eoceno e Oligoceno (47.5-23.0 Ma) testemunhou importantes mudanças paleoclimáticas e paleogeográficas. Eventos como o resfriamento global abrupto Oi-1 (~34 Ma), que coincidente com a principal fase de glaciação da Antártida; o Ótimo Climático do Eoceno Médio (MECO, ~40Ma); e eventos de aquecimento de curta duração conhecidos como "hipertermais". A cronoestratigrafia de alta resolução é fundamental para a determinação da sequência destes eventos em registros geológicos. Neste trabalho mostraremos resultados magnetoestratigráficos ao longo do intervalo Eoceno-Oligoceno de sucessões do Oceano Índico (testemunho ODP 711A) e Neo-Tétis Oriental (seção de *Monte Cagnero*). Os principais eventos climáticos globais do Eoceno e Oligoceno foram reconhecidos nestas seções e datados usando modelos de idade de alta resolução baseado em magnetoestratigrafia.

### Introdução

O Eoceno é caracterizado por condições climáticas bem mais quentes que as atuais e por uma tendência de resfriamento no Eoceno inferior. Próximo ao final do Eoceno e começo do Oligoceno ocorreu um dos eventos climáticos chave na história da Terra. Esse evento é uma transição climática abrupta e profunda de resfriamento de 3-4°C que marcou a primeira fase glacial da Antártica (e.g. Zachos et al., 2001). O evento Oi-1 foi um momento crítico da mudança de uma condição climática "greenhouse" antes do Eoceno para condições "icehouse" do Oligoceno até hoje. Esta transição ocorreu concomitante ao começo da fase Orogênica Alpes-Himaláia, um abrupto aumento da glaciação da Antártica e o início da circulação termoalina no Atlântico (e.g., Liu et al., 2009). Durante esta transição climática, nota-se uma mudança global na distribuição de sedimentos marinhos, com um maior decréscimo na compensação de carbonatos de cálcio nas partes profundas (CCD – *Calcite Compensation Depth*), e uma variação na distribuição da produtividade primária marinha (e.g. Coxall et al., 2005; Via & Thomas, 2006; Billups, 2008).

Sobreposto à tendência de resfriamento, eventos de curta duração, conhecido como "hipertermais", apresentam mudanças rápidas na concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico e temperatura (e.g., Zachos et al., 2008). Entre estes eventos o mais importante é o Máximo Térmico do Paleoceno-Eoceno (PETM, ~55 Ma), onde a temperatura média do planeta aumentou em 6 °C num período de 20.000 anos. Outro evento importante ocorreu em aproximadamente 40 Ma, denominado por uma "aberração" por Zachos et al. (2001) devido ao aumento abrupto de temperatura (4-5 °C) por aproximadamente 500.000 anos (Bohaty et al., 2003).

Os carbonatos pelágicos das Formações *Scaglia Variegata* e *Scaglia Cinerea* encontrados na seção de *Monte Cagnero* (Itália) (Figura 1), que representa a margem norte da Neo-Tétis Ocidental, é particularmente marcante pela sua continuidade e preservação e, desta forma, pode ser também considerada como uma seção-tipo a ser utilizada para o estudo deste eventos climáticos e correlações globais (Coccioni et al., 2008). Carbonatos pelágicos de mesma idade são encontrados no testemunho 711A da *Oceanic Drilling Program* (ODP), na porção NE do Oceano Índico (Backman & Duncan, 1990) (Figura 1).

Aqui mostraremos os modelos idade através da magnetoestratigrafia de alta resolução para a datação dos principais eventos climáticos ocorridos durante o Eoceno e Oligoceno e registrado nos sedimentos das seções Neotetianas de *Monte Cagnero* e do testemunho 711A da ODP.

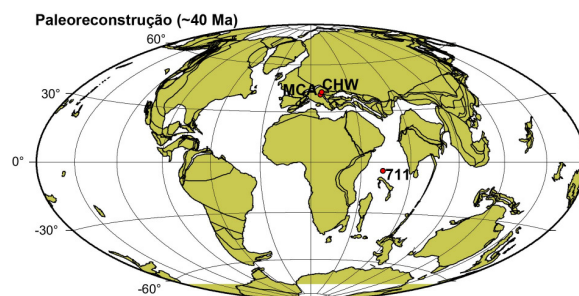


Figura 1 – Mapa da paleoreconstrução (~40 Ma) das seções de *Monte Cagnero* (MCA) e o testemunho 711A do Oceano Índico (Modificado de Savian et al., 2013).

## Área de Estudo

Na Bacia de Umbria-Marche (Itália), a seção de Monte Cagnero (Figura 2A) é uma seção contínua que compreende o Eoceno superior até o Oligoceno, recentemente proposta como uma seção-modelo para a transição Rupeliano/Chattiano (Coccioni et al., 2008). A seção consiste de calcários margosos e margas pertencentes às formações Scaglia Variegata e Scaglia Cinerea. A seção de Monte Cagnero é a única contínua e bem exposta na Bacia de Umbria-Marche, que poderá ser utilizada na correlação com outras seções de mesma idade.

O testemunho 711A da ODP (Figura 2B) foi coletado em 1988 no Oceano Índico com o objetivo de estudar a dissolução e sedimentação da bacia, bem como a evolução do hotspot Réunion durante o Cenozóico. Os sedimentos consistem de argilas brancas e marrons e nanofósseis/radiolarianos acinzentados, respectivamente (Backman & Duncan, 1990).

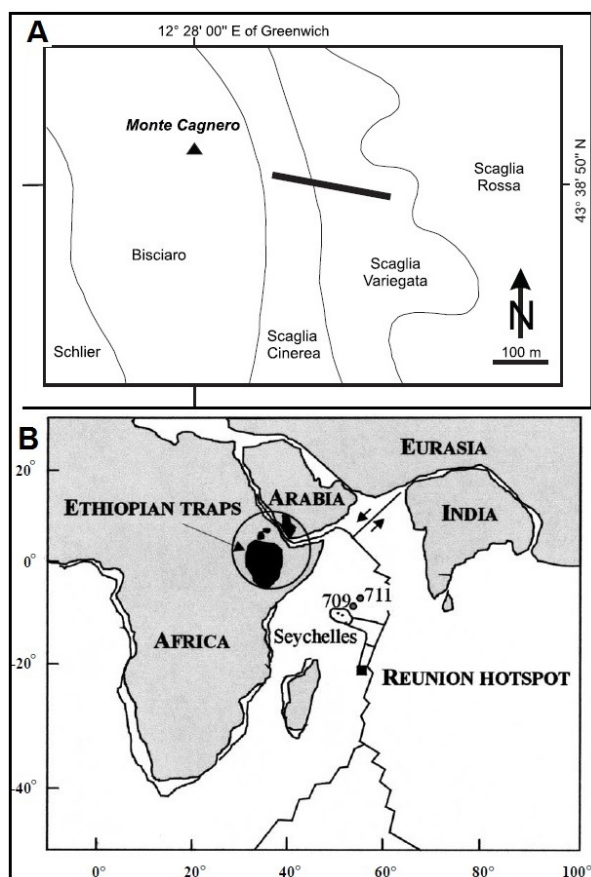


Figura 2 – (A) Mapa geológico com as principais formações da seção de Monte Cagnero (Modificado de Coccioni et al., 2008). (B) Mapa com a localização do sítio 711A da ODP (Modificado de Touchard et al., 2003).

## Metodologia/ Problema Investigado

Nos estudos paleomagnéticos e magnetoestratigráficos foram utilizados os procedimentos tradicionais (Collinson, 1983) para a investigação a estabilidade magnética na identificação das componentes de magnetização. A estabilidade magnética foi examinada através de desmagnetização térmica e por campos alternados (AF) de amostras orientadas coletadas em campo na seção de Monte Cagnero (Itália) e através de desmagnetização por campos alternados para o sítio 711A da ODP. As medidas foram efetuadas no magnetômetro criogênico 2G-Enterprise do *National Oceanography Centre Southampton* (NOCS), Universidade Southampton, UK. Este equipamento é acomodado numa sala magneticamente isolada (*magnetically shielded room*), concebida para evitar interferências do campo magnético ambiente durante as medidas da fraca remanência das rochas sedimentares. Para a identificação das componentes de magnetização serão feitas análises vetoriais de Zijderveld (1967) e análise por componentes principais (Kirschvink, 1980).

O controle da mineralogia magnética ao longo das seqüências estudadas foi feito a partir de: valores de susceptibilidade magnética, curvas termomagnéticas, curvas de histerese (incluindo diagramas FORC – *First Order Reversal Curve*), curvas de aquisição de magnetização isothermal (IRM) e magnetização remanente anisterética (ARM) (Tauxe, 2014). Avanços recentes na análise de dados magnéticos permitem caracterizar misturas complexas, compreendendo dois ou mais minerais portadores de remanência (e.g., Kruiver et al., 2001, caso frequente em rochas sedimentares. As medidas também foram realizadas no Laboratório de Paleomagnetismo do NOCS em Southampton, UK.

O principal objetivo deste trabalho é fornecer vínculos temporais mais precisos para a datação dos eventos climáticos ocorridos durante o Eoceno e Oligoceno.

## Resultados

A seção de Monte Cagnero possui valores de magnetização remanente natural (NRM) variando entre  $4.27 \times 10^{-10} \text{ Am}^2/\text{kg}$  e  $4.71 \times 10^{-7} \text{ Am}^2/\text{kg}$ , com uma média de  $3.49 \times 10^{-8} \text{ Am}^2/\text{kg}$  (Jovane et al., 2013). Os sedimentos da seção de *Monte Cagnero* são compostos por uma mistura complexa de portadores magnéticos de alta (hematita/goetita) e baixa (magnetita) coercividade.

Após a análise das componentes de desmagnetização térmica e campos alternados dividimos a seção em treze magnetozonas (Figura 3). Estas magnetozonas foram interpretadas com base na escala temporal de polaridade magnética (*Geomagnetic Polarity Time Scale - GPTS*) de Vandenberghe et al. (2012). As magnetozonas reconhecidas compreendem os chrons C18r (41.15 Ma) até C12r (31.03 Ma).

Os eventos climáticos Oi-1 e MECO foram registrados e datados na seção de *Monte Cagnero* (Savian et al., no

*prelo*) (Figura 3). O evento Oi-1 está localizado no topo do chron C13r (aproximadamente 33.7 Ma). O evento MECO encontra-se na base do chron C18n.2n (aproximadamente 40 Ma). Estes eventos concordam com as datações mais precisas obtidas em testemunhos marinhos coletados pela ODP (Coxall et al., 2005; Bohaty et al., 2009).

A intensidade da NRM das amostras analisadas do testemunho ODP 711A mostram variações significativas entre  $5.23 \times 10^{-5}$  e  $1.77 \times 10^{-1}$  A/m com média de  $5.27 \times 10^{-3}$  A/m (Savian et al., 2013). O portador magnético das amostras estudadas é a magnetita. A porção estudada do testemunho ODP 711A foi subdividida em quatorze magnetozonas, do chron C19r (43.43 Ma) até o chron C12r (31.03 Ma) (Figura 3). O Oi-1 e MECO também foram datados e registrados (Savian et al., *em preparação*) nos sedimentos do testemunho ODP 711A e foram datados conforme Monte Cagnero.

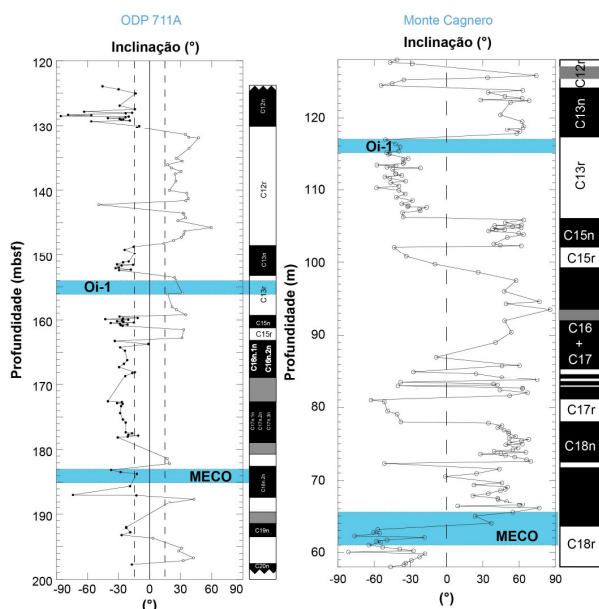


Figura 3 – Inclinação magnética do testemunho ODP 711A (Savian et al., 2013) e da seção de Monte Cagnero (Jovane et al., 2013) e a interpretação das magnetozonas baseado em Vandenberghe et al. (2012). Os eventos climáticos mais importantes do período foram datados.

### Discussão e Conclusões

Neste trabalho apresentamos o registro magnetoestratigráfico do testemunho ODP 711A (Oceano Índico) e da seção de Monte Cagnero (Itália). Os dados magnetoestratigráficos proporcionaram a obtenção de um modelo de idades para as rochas dessas seções que compreendem o período entre o Eoceno médio e o Oligoceno inferior.

Os resultados magnetoestratigráficos do testemunho ODP 711A correlacionados com a GPTS fornecem idades entre os chrons C19r e C12r (43.43 e 31.03 Ma).

O mesmo ocorre com os sedimentos da seção de Monte Cagnero que são correlacionados e datados entre os chrons C18r e C12r (43.43 e 31.03 Ma).

O modelo de idades obtido para as seções proporcionou a datação dos eventos climáticos cruciais para este período. Estes eventos foram identificados com dados isotópicos e bioestratigráficos por Savian et al. (*no prelo*) e Savian et al. (*em preparação*).

Dessa forma, a magnetoestratigrafia é uma das mais importantes ferramentas de datação de rochas. Nestes trabalhos vimos a importância desta técnica para a datação de eventos climáticos globais. Particularmente nestes trabalhos mostramos a datação de dois eventos climáticos importantes ocorridos no Eoceno e Oligoceno. A correta datação destes eventos é fundamental para entender as mudanças “greenhouse” para “icehouse” que ocorreram no planeta durante este período.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da Marie Curie Action (FP7-PEOPLE-IEF-2008 proposta n. 236311, ao Concelho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq processo 201508/2009-5) e ao Concelho de Desenvolvimento de Pessoal do Nível Superior (CAPES).

### Referências

- Backman, J. & Duncan, R.A., (1988). Proc. ODP, Init. Repts., 115, College Station, TX, 1-76.
- Billups, K. (2008). A tale of two climates. Nature Geoscience, 1, 294-295.
- Bohaty, S.M. & Zachos, J.C. (2003). A significant Southern Ocean warming event in the late middle Eocene. Geology, 31, 1017-1020.
- Bohaty, S.M., Zachos, J.C., Florindo, F. & Delaney, M. L. (2009). Coupled greenhouse warming and deep-sea acidification in the middle Eocene. Paleoclimatology, 24, PA2207.
- Coccioni, R., Marsili, A., Montanari, A., Bellanca, A., Neri, R., Bice, D.M., Brinkhuis, H., Church, N., Macalady, A., McDaniel, A., Deino, A., Lirer, F., Sprovieri, M., Maiorano, P., Monechi, P., Nini, C., Nocchi, M., Pross, J., Rochette, P., Sagnotti, L., Tateo, F., Touchard, Y., Van Simaey, S. & Williams, G.L. (2008). Integrated stratigraphy of the Oligocene pelagic sequence in the Umbria-Marche basin (northeastern Apennines, Italy): A potential Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the Rupelian/Chattian boundary). Geological Society of America Bulletin, 120, 487-511.
- Collinson, D.W. (1983). Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism: Techniques and Instrumentation. Chapman & Hall, London, 503pp.

- Coxall, H. K., Wilson, P. A., Pälike, H., Lear, C.H. & Backman, J. (2005). Rapid stepwise onset of Antarctic glaciations and deeper calcite compensation in the Pacific Ocean. *Nature*, 433, 53–57.
- Jovane, L., Savian, J.F., Coccioni, R., Frontalini, F., Bançalà, G., Catanzaritu, R., Luciani, V., Bohaty, S.M., Wilson, P.A., & Florindo, F. (2013). Integrated magnetostratigraphy of the middle Eocene-lower Oligocene interval from the Monte Cagnero section, central Italy. *Geological Society of London Special Publications*, 373, 79-95.
- Kirschvink, J.L. (1980). The least squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysics Journal of the Royal Astronomic Society*, 62, 699-718.
- Kruiver, P.P., Dekkers, M.J., & Heslop, D. (2001). Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetization. *Earth Planetary Science Letters*, 189, 269-276.
- Liu, Z., Pagani, M., Zinniker, D., DeConto, R., Huber, M., Brinkhuis, H., Shah, S.R., Leckie, R.M., & Pearson, A. (2009). Global Cooling During the Eocene-Oligocene Climate Transition. *Science*, 323, 1187-1190.
- Savian, J.F., Jovane, L., Bohaty, S.M., & Wilson, P.A. (2013). Middle Eocene to early Oligocene magnetostratigraphy of ODP Hole 711A (Leg 115), western equatorial Indian Ocean. *Geological Society of London Special Publications*, 373, 97-110.
- Savian, J.F., Jovane, L., Frontalini, F., Trindade, R.I.F., Coccioni, C., Bohaty, S.M., Wilson, P.A., Florindo, F., Roberts, A.P., Catanzariti, R. & Iacoviello, F. (*no prelo*). Enhanced primary productivity and magnetotactic bacterial production in response to middle Eocene warming in the Neo-Tethys Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.
- Savian, J.F., Jovane, L., Giorgioni, M., Iacoviello, F., Sprovieri, M., Roberts, A.P. & Florindo, F. (em preparação). High-resolution environmental magnetism of middle Eocene to early Oligocene sediments in the equatorial Indian Ocean: Paleoclimatic implications of detrital and biogenic components during the extreme climate events.
- Tauxe, L. (2014). *Essentials of Paleomagnetism: Third Web Edition*. La Jolla, CA.
- Touchard, Y., Rochette, P., Aubry, M.P. & Michard, A. (2003). High-resolution magnetostratigraphic and biostratigraphic study of Ethiopian traps-related products in Oligocene sediments from the Indian Ocean. *Earth and Planetary Science Letter*, 206, 493-508.
- Vandenbergh, N., Hilgen, F.J. et al. (2012). The paleogene period, chapter 28. In: Gradstein, F.M., Ogg, J. G. & Smith, A. G. (eds) *A Geologic Time Scale*. Cambridge University Press, Cambridge, 855–941.
- Via, R.K., & D.J. Thomas (2006). Evolution of Atlantic thermohaline circulation: Early Oligocene onset of deep-water production in the North Atlantic. *Geology*, 34, 441-444.
- Zachos, J. C., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. & Billups, K. (2001). Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292, 686–693.
- Zachos, J.C., Dickens, G.R., & Zeebe, R.E. (2008). An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, 451, 279-283.
- Zijderveld, J. D. A., (1967). A.C. demagnetization of rocks, in *Analysis of results, in Methods in Paleomagnetism*, edited by D.W. Collinson, pp. 254–286, Elsevier Sciences, New York.