



## PALEOINTENSIDADE DURANTE O PRECAMBRIANO: TESTES MAGNÉTICOS PRELIMINARES EM ALVOS DO BRASIL

Karine Z. Carvas<sup>1\*</sup>, Ricardo I. F. Trindade<sup>1</sup>, Gelvan A. Hartmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, Brasil

### Resumo

Os processos de estratificação do núcleo terrestre e sua influência no campo magnético são ainda motivo de controvérsias. Estimativas para a formação do núcleo interno sólido, baseadas em dados geoquímicos ou em modelos termodinâmicos, variam desde o Arqueano até o início do Cambriano. Os dados de paleointensidade poderiam servir como evidência experimental para este processo, uma vez que a formação do núcleo interno coincide com o início do processo de *convecção composicional*, aumentando a estabilidade do campo. No entanto, a atual base de dados de paleointensidade absoluta para o Arqueano e o Proterozóico é ainda bastante limitada, apresentando menos de 50 determinações entre 3,50 e 0,50 Ga. Com o objetivo de traçar a variação de intensidades em diferentes épocas, pretende-se efetuar medidas de paleointensidade em rochas ígneas de 9 regiões distintas no Brasil, cujas magnetizações mostraram-se estáveis e/ou com bons dados geocronológicos em trabalhos anteriores. As amostras já foram coletadas, e serão analisadas utilizando-se protocolos de *duplo aquecimento* em rochas.

### Abstract

The stratification of the Earth's core and its influence on the geomagnetic field are still a matter of debate in the literature. Estimations of the onset of the solid inner core, based on geochemical or thermodynamics models, vary from the Archean to Cambrian ages. Paleointensity data could help on solving these questions, since the inner core formation would be linked to the start of the *compositional convection* into the core, thus increasing the field's stability. However, the current database of absolute paleointensities for the Archean and the Proterozoic is still very limited, containing less than 50 entries between 3.50 and 0.50 Ga. In order to characterize the variation of the field's intensity in throughout the Precambrian, we intend to measure the paleointensity of already collected volcanic rock samples from 9 different regions in Brazil by using *double heating* protocols. The samples have already been analyzed in previous works, in which they showed to have a stable magnetization and reliable geochronological data.

### Introdução

A evolução do núcleo terrestre, do manto e do campo magnético terrestre são fenômenos intrinsecamente relacionados (Merril et al., 1998). Estudos paleomagnéticos indicam que a Terra possui um campo magnético desde o Arqueano (McElhinny & Evans, 1968; Hale & Dunlop, 1984; Tarduno et al., 2007). Entretanto, os processos associados à estratificação final do núcleo e sua influência no campo geomagnético permanecem tema de debate. Por exemplo, modelos geoquímicos para a idade de formação do núcleo interno indicam uma formação precoce (Brandon et al., 2003), enquanto modelos termodinâmicos sugerem uma cristalização tardia, entre 1,70 e 0,50 Ga a depender da concentração de elementos radioativos (Labrosse et al., 1997, 2001; Labrosse & Macouin, 2003).

A base de dados de paleointensidades é de fundamental importância na resolução destes problemas, mas seu quadro é particularmente crítico para idades anteriores a 500 Ma: somam-se menos de 50



determinações para todo o período compreendido entre o Arqueano e o Cambriano, que provêm principalmente do escudo Canadense. A principal razão para a escassez de resultados é a falta de alvos precambrianos que preencham os requisitos impostos pelos protocolos de duplo aquecimento tipo Thellier (Thellier & Thellier, 1959). Somente amostras com portadores magnéticos com estrutura tipo domínio simples (DS) obedecem às leis empíricas de Thellier e são favoráveis às análises. Além disso, as amostras não devem sofrer alterações importantes na mineralogia magnética durante as várias horas de aquecimento desse protocolo experimental.

Este projeto tem como objetivo definir a intensidade do campo magnético terrestre durante diversos eventos geológicos que vão de 1800 Ma a 525 Ma, aproximadamente. Foram selecionados nove alvos: (i) diques máficos de Itabaiana e Monteiro (0,52 Ga), (ii) vulcanismo da bacia de Camaquã (0,60 Ga e 0,57 Ga), (iii) diques mesoproterozóicos do estado da Bahia (1,08-1,01 Ga), (iii) Formação Nova Floresta (1,20 Ga), (iv) intrusivas Figueira Branca (1,25 Ga), (v) diques do Uruguai (1,73 Ga), (vi) diques de Uauá (1,90 Ga), (vii) suíte Colider (1,80 Ga), (viii) supergrupo Roraima (1,98 Ga e 1,78 Ga) e (ix) diques máficos de Carajás e Igarapé Bahia (2,64 Ga). Todo o material já se encontra disponível na litoteca do Laboratório de Paleomagnetismo. Além disso, tais coleções já foram objeto de estudos paleomagnéticos e geocronológicos por nosso grupo de pesquisa. Estes trabalhos prévios indicam condições favoráveis para a realização dos experimentos de paleointensidade.

### **Geologia das regiões estudadas**

**Itabaiana e Monteiro (0,52 Ga)** - Os enxames de diques de Itabaiana e Monteiro intrudem os ortognaiss paleoproterozóicos do terreno Alto Moxotó, na Província Borborema (Trindade et al., 2006). Eles têm composição basáltica a andesítica, tendo sido datados em  $525 \pm 5$  Ma (idades plateau Ar-Ar, rocha total).

**Bacia do Camaquã: vulcanismo Hilário (0,60 Ga) e Acampamento Velho (0,57 Ga)** - Dois eventos de vulcanismo importantes de idade Ediacariana são descritos na Bacia do Camaquã, sul do Brasil (Fambrini et al., 2007). A Formação Hilário tem idades entre  $590 \pm 6$  Ma (U-Pb em zircão) e  $586 \pm 8$  Ma (Ar-Ar em plagioclásio). A Formação Acampamento Velho tem idades entre  $574 \pm 7$  Ma e  $572 \pm 3$  Ma (U-Pb em zircão).

**Diques de Ilhéus, Olivença e Salvador (1,08-1,01 Ga)** - Três enxames de diques Mesoproterozóicos foram identificados ao longo do litoral sul da Bahia (cráton do São Francisco). Foram identificados três conjuntos de pólos, com idades de  $1012 \pm 24$  Ma,  $1021 \pm 8$  Ma e  $1078 \pm 18$  Ma (D'Agrella-Filho et al., 1990, 2004).

**Formação Nova Floresta (1,20 Ga)** - As rochas máficas da Formação Nova Floresta afloram na borda sudoeste do cráton Amazônico, a norte da faixa de dobramentos Nova Brasilândia, no estado de Rondônia. Elas compreendem microgabros e basaltos acamadados, intrusivos na suíte granítica Alto Candeias (Bettencourt et al., 1999). As datações Ar-Ar em plagioclásio e biotita, separados a partir dos gabros, fornecem idades de resfriamento concordantes em  $1198 \pm 3$  Ma e  $1201 \pm 2$  Ma, respectivamente.

**Figueira Branca (1,25 Ga)** - Os gabros Figueira Branca afloram na porção oeste do estado de Mato Grosso, próximo à cidade de Indivaí. Resultados geocronológicos ainda inéditos indicam idades entre  $1222 \pm 3$  Ma e  $1268 \pm 4$  Ma (Ar-Ar em biotita).

**Diques do Uruguai (1,73 Ga)** - O enxame de diques do Uruguai corta granitóides e gnaisses paleoproterozóicos do cráton Rio de la Plata. Esses diques toleíticos a calcio-alcálinos possuem mineralogia magnética estável sem evidências de processos de alteração nas curvas termomagnéticas (Halls, 2001). Foram obtidas idades Ar-Ar concordantes em biotita e hornblenda de  $1727 \pm 10$  Ma e  $1725 \pm 10$  Ma (Teixeira et al., 1999). Uma datação U-Pb em badeleíta forneceu uma idade de  $1790 \pm 5$  Ma (Halls et al., 2001).



**Suíte Colider (1.80 Ga)** - A suíte vulcânica Colider aflora na região do Mato Grosso, entre Alta Floresta e Aripuanã, no cráton Amazônico. Ela compreende as rochas mapeadas como Formação Iriri, bem como aquelas que contornam a Serra de Apiacás pelo Norte (Lacerda-Filho et al., 2001). Também são reconhecidas como parte da Suíte Colider as rochas vulcânicas, subvulcânicas, piroclásticas e epiclásticas aflorantes nas redondezas da cidade de Colider, na borda da Serra do Cachimbo (Oliveira & Albuquerque, 2004). Datações U-Pb (zircão) para a Suíte Colider resultaram em idades de  $1781 \pm 8$  Ma e  $1786 \pm 17$  Ma (Lacerda-Filho et al., 2001).

**Supergrupo Roraima: vulcanismo Surumu (1,98 Ga) e Avanaveiro (1.78 Ga)** - Serão estudadas duas unidades vulcânicas aflorantes na porção norte do estado de Roraima. O extenso vulcanismo ácido a intermediário Surumu foi datado em  $1984 \pm 9$  Ma (U-Pb SHRIMP em zircão, Santos et al., 2003). O magmatismo Avanaveiro compreende sills e diques máficos a intermediários. Datações U-Pb SHRIMP situam este evento em  $1782 \pm 3$  Ma (Santos et al., 2003).

**Diques máficos de Carajás e Igarapé Bahia (2,64 Ga)** - Os arenitos e siltitos da Formação Águas Claras, na região de Carajás (Pará) são intrudidos por diques e sills de doleritos datados em  $2645 \pm 12$  Ma (U-Pb em zircão, Dias et al., 1996). Esta idade é semelhante às idades obtidas em diques que seccionam a seqüência vulcano-sedimentar do Igarapé Bahia, de  $2653 \pm 48$  Ma (U-Pb SHRIMP em zircão, Tallarico et al., 2005). Dois conjuntos de amostras de diques e sills de Carajás e do Igarapé Bahia foram recentemente coletados em furos de sondagem verticais da Companhia Vale do Rio Doce. Foram também coletados os sedimentos situados no contato das intrusões até uma distância de 50 metros para testes de contato.

## Metodologia

Para a investigação da paleointensidade pretende-se utilizar o *protocolo de Aitken* para amostras de rocha. Será incorporado a esse protocolo o processo de *desmagnetização a baixas temperaturas* (DBT) como uma forma de se investigar a influência de grãos MD. Estudos paleomagnéticos, curvas termomagnéticas e de histerese serão conduzidos antes da obtenção das paleointensidades para selecionar as amostras mais favoráveis.

### Princípios básicos:

Observa-se experimentalmente que a magnetização termoremanescente ( $\vec{M}_{TR}$ , em  $A.m^{-1}$ , ampère sobre metro) é linearmente proporcional à intensidade do campo indutor ( $\vec{H}_{LAB}$ , também em  $A.m^{-1}$ ) para campos relativamente baixos. O mesmo ocorre com a magnetização remanescente natural ( $\vec{M}_{NR}$ , em  $A.m^{-1}$ ) e um campo magnético natural  $\vec{H}_A$  ( $A.m^{-1}$ ):

$$\left| \vec{M}_{TR} \right| = \alpha \left| \vec{H}_{LAB} \right| \text{ e } \left| \vec{M}_{NR} \right| = \alpha \left| \vec{H}_A \right| \quad A.m^{-1} \quad [1]$$

Se as constantes realmente forem iguais, pode-se determinar a intensidade do paleocampo de forma direta por:

$$\left| \vec{H}_A \right| = \frac{\left| \vec{M}_{NR} \right|}{\left| \vec{M}_{TR} \right|} \left| \vec{H}_{LAB} \right| \quad A.m^{-1} \quad [2]$$

Na prática, efetuam-se passos de desmagnetização térmica da NRM e passos de aquisição de TRMs nos mesmos intervalos de temperatura ( $T_i$ ). Obtém-se assim uma série de valores de paleocampo correspondentes a cada intervalo. Esse procedimento é sujeito a interferências, principalmente alterações químicas e presença de grãos tipo multidomínio (que não obedecem às leis de Néel). Para a detectá-las foram definidos vários testes experimentais, geralmente incorporados aos protocolos de duplo aquecimento – os “*pTRM checks*” (Coe, 1967) e “*pTRM tail checks*” (Riisager e Riisager, 2001).



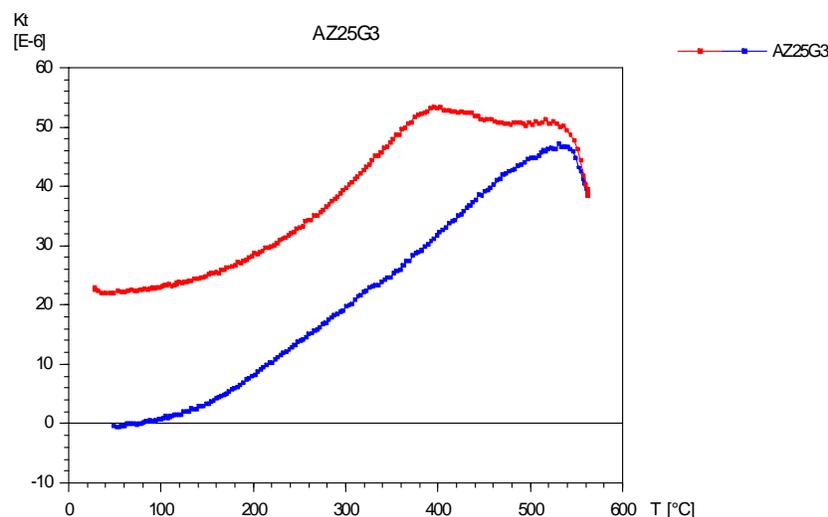
Projeções ortogonais, gráficos do momento magnético como função da temperatura e diagramas de Arai (Nagata et al., 1963) são sistematicamente usados para representar os resultados dos experimentos de paleointensidade, e indicam os intervalos de temperatura mais favoráveis aos cálculos. A técnica usual para estimar a inclinação da reta no diagrama de Arai é a de mínimos quadrados (York, 1966, 1967).

### *Desmagnetizações a baixas temperaturas (DBT)*

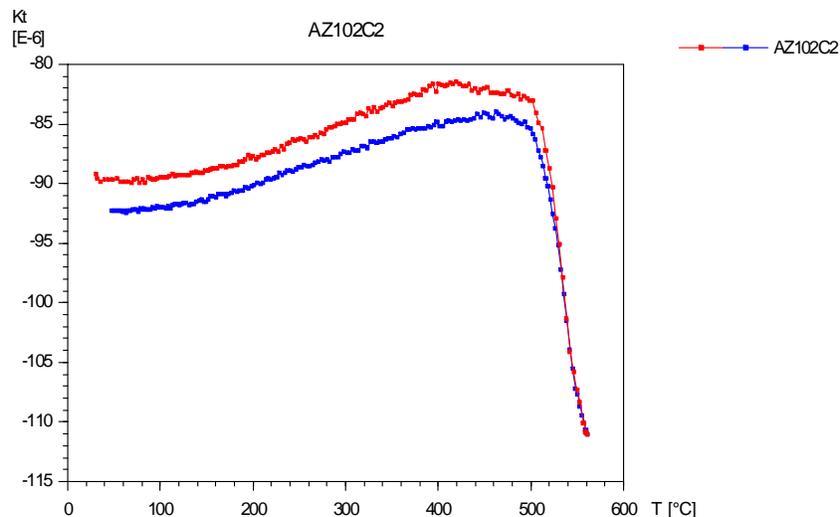
Existem duas contribuições predominantes para a desmagnetização a baixas temperaturas num grão magnético MD (Muxworthy & McClelland, 2000): a reorganização cinemática dos estados de domínio ocorrida no ponto isotrópico ( $-143^{\circ}\text{C}$ ), e a mudança na estrutura cristalina, de cúbica para monoclinica, ocorrida na transição de Verwey ( $-153^{\circ}\text{C}$ ) (Özdemir & Dunlop, 1999; Muxworthy & McClelland, 2000). Grãos com estrutura de domínio simples (DS) são pouco afetados durante o mesmo processo.

### **Resultados preliminares**

Tendo em vista a complexidade e o tempo necessário para efetuar as determinações de paleointensidades e a baixa taxa de sucesso característica desse tipo de medida, é necessário efetuar uma caracterização magnética rigorosa das coleções antes de efetuar as medidas. Para aquisição de dados de paleointensidade, dois aspectos principais devem ser investigados: a estabilidade térmica das amostras e a estrutura de domínio dos portadores magnéticos. Portanto, uma série de análises termomagnéticas foi iniciada nas coleções listadas anteriormente para determinar quais os alvos mais propícios para as medidas de paleointensidade. Até agora, foram realizados testes termomagnéticos nos gabros Figueira Branca, em amostras-piloto dos 16 sítios onde direções paleomagnéticas estáveis foram isoladas em um estudo prévio. As amostras foram aquecidas até uma temperatura de  $550^{\circ}\text{C}$  e posteriormente resfriadas; o ciclo de aquecimento-resfriamento foi efetuado em atmosfera ambiente (oxidante). A quase totalidade das curvas de suscetibilidade obtidas apresentou grande alteração química com o aquecimento muito antes de atingir os  $500^{\circ}\text{C}$ , sem nenhum comportamento padrão (exemplo na figura 1). Sendo assim, tal coleção será descartada dos testes seguintes, já que as amostras não apresentam estabilidade térmica. Os mesmos testes serão efetuados nas outras coleções, visando encontrar grupos que correspondam às exigências dessa primeira fase de seleção, para depois prosseguir com os protocolos de duplo aquecimento.



**Figura 1:** Exemplo de curva de suscetibilidade da intrusiva Figueira Branca, apresentando alteração química significativa durante o aquecimento. Quase todas as amostras da região geraram curvas com alteração significativa.



**Figura 2:** única das 16 curvas que apresentou pequena alteração química durante o experimento.

## Referências

- Aitken, M.J., Allsop, A.L., Bussel, G.D. & Winter M.B., 1988, Determination of the intensity of the Earth's magnetic field during archeological times: Reliability of the Thellier technique, *Rev. Geophys.*, 26, 3-12.
- Bettencourt, J.S., Tosdal, R.M., Leite, W.B. & Payolla, B.L., 1999. Mesoproterozoic rapakivi granites of the Rondonia Tin Province, southwestern border of the Amazonian craton, Brazil – I. Reconnaissance U-Pb geochronology and regional implications. *Precambrian Res.*, 95, 41-67.
- Böhnel, H., McIntosh, G. & Sherwood, G., 2002, A parameter characterising the irreversibility of thermomagnetic curves, *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, 1305-1309.
- Brandon, A.D., Walker, R.J., Puchtel, I.S., Becker, H., Humayun, M. & Revillon S., 2003,  $^{186}\text{Os}$ - $^{187}\text{Os}$  systematics of Gorgona Island komatiites: implications for early growth of the inner core, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 206, 411-426.
- Celino K.R., Trindade, R.I.F. & Tohver, E., 2007, LTD-Thellier paleointensity of 1.2 Ga Nova Floresta mafic rocks (Amazon craton), *Geophys. Res. Lett.*, 34, L12306/1-L12306/6.
- Celino, K.R., 2007, Paleointensidade do campo magnético terrestre no Proterozóico, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 109 pp.
- D'Agrella Filho, M. S. ; Pacca, Igor Ivory Gil ; Trindade, R. I. F. ; Teixeira, Wilson ; Raposo, M. I. B.; Onstott, T. C., 2004, Paleomagnetism and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of mafic dykes from Salvador (Brazil): new constraints on the São Francisco Craton APW path between 1080 and 1010 Ma.. *Precambrian Research*, Holanda, v. 132, 55-77.
- Dunlop, D.J. & Yu, Y., 2004, Intensity and polarity of the geomagnetic field during Precambrian time. *Timescales of the Paleomagnetic Field*, *Geophys Monogr. Ser.*, 145, edited by J. E. T. Channell et al., pp. 85-100, AGU, Washington, D. C.
- Dunlop, D.J., 2007, A more ancient shield. *Nature*, 446, 623-625.
- Fambrini, G. L., Janikian, L., Almeida, R. P., Fragoso-Cesar, A. R. S., 2007. Evolução Estratigráfica e Paleogeográfica do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-bacia Camaquã Central, RS, *Geologia USP. Série Científica*, v. 7, p. 1-24, 2007.
- Hale, C.J., & Dunlop, D.J., 1984., Evidence for an early Archean geomagnetic field; a paleomagnetic study of the Komati Formation, Barberton greenstone belt, South Africa. *Geophys. Res. Lett.*, 11, 97-100.



- Halls, H.C., Campal, N., Davis, D.W., Bossi, G., 2001, Magnetic studies and U–Pb geochronology of the Uruguayan dyke swarm, Rio de la Plata craton, Uruguay: paleomagnetic and economic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 14, 349-361.
- Labrosse, S., 2003, Thermal and magnetic evolution of Earth's core. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 140, 127-143, doi:10.1016/j.pepi.2003.07.006.
- Labrosse, S., Poirier, J.P. & Le Mouel, J.L., 2001, The age of the inner core. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 190, 111-123.
- Lacerda-Filho, J.V., Souza, J.O., Oliveira, C.C., Ribeiro, P.S.E., Boas, P.F.V., Albuquerque, M.C., Frasca, A.A.S., Borges, F.R., Moreton, L.C., Martins, E.G., Camargo, M.A., Valente, C.R., Pimentel, M.M. e Botelho, N.F., 2001. Geologia e evolução tectônica da região norte do Mato Grosso (Projeto Promin-Alta Floresta). In: SBG, Simp. Geol. Amazônia, 7, Belém, Sessão Temática VII.
- McElhinny, M.W. & Evans, M.E., 1968, An investigation of the strength of the geomagnetic field in the early Precambrian. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1, 485-497.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W. & McFadden, P.L., 1998, *The Magnetic Field of the Earth*. Academic Press, International Geophysics Series Vol. 63, 531pp.
- Muxworthy, A.R. & McClelland, E., 2000, The causes of low-temperature demagnetization of remanence in multidomain magnetite, *Geophys. J. Int.*, 140, 115-131.
- Nagata, T., Arai, Y. & Momose, K., 1963, Secular variation of the geomagnetic total force during the last 5000 years. *J. Geophys. Res.*, 68, 5277-5281.
- Néel, L., 1955, Some theoretical aspects of rock-magnetism. *Adv. Phys.*, 4, 191-243.
- Oliveira, C.C.O. e Albuquerque, M.C., 2004. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Projeto Província de Alta Floresta (PROMIN ALTA FLORESTA). Geologia e recursos minerais da Folha Alta Floresta(SC.21-Z- X-C). Brasília, CPRM
- Özdemir, Ö. & Dunlop, D.J., 1999, Low-temperature properties of a single crystal of magnetite oriented along principal magnetic axes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 165, 229–239.
- Riisager, P. & Riisager, J., 2001, Detecting multidomain magnetic grains in Thellier paleointensity experiments. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 125, 111-117.
- Santos, J.O.S., Potter, P.E., Reis, N.J., Hartmann, L.A., Fletcher, I.R. & McNaughton, N.J., 2003. Age, source, and regional stratigraphy of the Roraima Supergroup and Roraima-Like outliers in northern South America based on U-Pb geochronology. *GSA Bulletin*, 115, 331-348.
- Smirnov, A.V. & Tarduno, J.A., 2003, Magnetic hysteresis monitoring of Cretaceous submarine basaltic glass during Thellier paleointensity experiments: evidence for alteration and attendant low field bias, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 206, 571–585.
- Smirnov, A.V., Tarduno, J.A. & Pisakin, B.N., 2003, Paleointensity of the early geodynamo (2.45 Ga) as recorded in Karelia: A single crystal approach, *Geology*, 31, 415-418, doi:10.1130/0091-7613.
- Tallarico, F.H.B., Figueiredo B.R., Groves, D.I., Kositcin, N., McNaughton, N.J., Fletcher, I.R. & Rego, J.L., 2005. Geology and Geochronology of the Igarapé Bahia Deposit, Carajás Copper-Gold Belt, Brazil: An Archean (2.57 Ga) Example of Iron-Oxide Cu-Au-(U-REE) Mineralization. *Economic Geology*, 100, 7-28.
- Tarduno, J.A., Cottrell, R.D., Watkeys, M.K. and Bauch, D., 2007, Geomagnetic field strength 3.2 billion years ago recorded by single silicate crystals. *Nature* 446.
- Teixeira, W., Renne, P.R., Bossi, J., Campal, N. & D'Agrella-Filho, M.S., 1999. 40Ar–39Ar and Rb–Sr geochronology of the Uruguayan dike swarm, Rio de la Plata Craton and implications for Proterozoic intraplate activity in western Gondwana. *Precambrian Res.*, 93, 153-180.
- Thellier, E. & Thellier, O., 1959, Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Géophys.*, 15, 275-376.
- Trindade, R.I.F., D'Agrella-Filho, M.S., Epof, I. & Brito Neves, B.B., 2006, Paleomagnetism of Early Cambrian Itabaiana mafic dikes (NE Brazil) and the final assembly of Gondwana. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 244, 361-377.
- York, D., 1966, Least-squares fitting of a straight line. *Can. J. Phys.*, 44, 1079-1086.
- York, D., 1967, The best isochron. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2, 479-482.