



AVALIAÇÃO REALÍSTICA DOS DADOS ARQUEOMAGNÉTICOS DA AMÉRICA DO SUL PARA OS ÚLTIMOS DOIS MIL ANOS

Wilbor Poletti*¹ e Ricardo Trindade¹

¹ Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.

* e-mail: wilbor.poletti@iag.usp.br

ABSTRACT

In order to understand the variations in the magnetic field in South America for the last two thousand years, a careful re-evaluation of existing data for that region in this time was performed. We used GEOMAGIA50 database and some recent works, in order to evaluate every available data in the literature. We concluded that the precariousness of data for that region in the proposed time (3.9%) becomes larger (1.1%) when strict criteria are applied. Thus, the only feature we observed with confidence for the last 2000 years is a drop in the field strength from 1650 AD.

Keywords: Arqueomagnetism, Database, Field model

RESUMO

Com o intuito de entender as variações do campo magnético na América do Sul para os últimos dois mil anos, foi realizada uma reavaliação criteriosa dos dados existentes para essa região nesse intervalo de tempo. Utilizou-se o banco de dados GEOMAGIA50 e alguns trabalhos recentes, de modo a utilizar tudo o que se têm na literatura. Concluiu-se que a precariedade dos dados para essa região no intervalo proposto (3.9%) torna-se maior (1.1%) quando critérios rigorosos são aplicados. Assim, a única feição que podemos afirmar de forma segura para os últimos 2000 anos é uma queda na intensidade do campo a partir de 1650 AD.

Palavras Chave: Arqueomagnetismo, Banco de dados, Modelo de campo

1. Introdução

Com o objetivo de estudar feições do campo geomagnético, como por exemplo, variações regionais e/ou globais de curto e/ou longo período, diversos bancos de dados foram criados de modo a centralizar os resultados de arqueo-paleomagnetismo (intensidades e direções) obtidos a partir de diversos trabalhos. Comumente, esses bancos de dados são criados a partir da junção de dados com período semelhante (*e.g.*, Precambriano, Holoceno). Dessa forma, fica viável analisar feições desde curto até longo comprimento, ou seja, variações do campo que vão desde *jerks* até reversões de polaridade. Além do mais, o acúmulo de dados, como por exemplo, do Holoceno, viabiliza a construção de modelos de campo geomagnéticos calculados por funções harmônicas esféricas, permitindo assim que feições tais como *Reversal Flux Patches* sejam mapeadas e estudadas (Terra-Nova *et al.*, 2015).

Neste trabalho foram realizadas revisões dos dados arqueomagnéticos existentes para a América do Sul para os últimos dois mil anos, e dos critérios atual de seleção de dados. Assim, todos os dados foram avaliados pelos critérios de seleção, permitindo uma pseudo-avaliação do campo magnético na América do Sul para o período referido.

2. Bancos de dados arqueo-paleomagnéticos

Atualmente os bancos de dados arqueo-paleomagnéticos existentes são: Magnetic Information Consortium



(MagIC); Absolute Paleointensity (PINT) Database; International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) Paleomagnetic Database; Global paleomagnetic database; Precambrian database PALEOMAGIA; Japan Archeomagnetism Database; e GEOMAGIA50 Database.

Para estudos do campo recente (Holoceno) o banco de dados mais atualizado atualmente é o GEOMAGIA50. Em sua terceira versão, o GEOMAGIA50 dispõe de ~9000 dados arqueomagnéticos provenientes de rochas vulcânicas e materiais arqueológicos e ~45000 dados provenientes de sedimentos. Além disso, ele possui cinco modelos de campo geomagnético calculados por funções harmônicas esféricas que permitem a obtenção de parâmetros magnéticos para qualquer localidade do globo.

2.1. Dados da América do Sul para os últimos dois mil anos

Utilizando o banco de dados GEOMAGIA50 e mais alguns dados recém publicados (Roperch *et al.*, 2014; 2015; Goguitchaichvili *et al.*, 2015), foi realizada uma reavaliação dos dados da América do Sul para os últimos dois mil anos de forma criteriosa, e com o objetivo de elucidar a real problemática da qualidade e falta de dados existente para essa região. Tal período foi escolhido devido a existência de materiais arqueológicos bem estudados, chegada da anomalia magnética do Atlântico Sul e, principalmente, o período em que são reportados picos de intensidade em diferentes regiões da Terra em alta resolução (DeGroot *et al.*, 2013).

Atualmente, o hemisfério Sul possui, para os últimos dois mil anos, cerca de 4.9% dos dados mundiais, onde 3.8% são dados da América do Sul. Na figura 1 é representada a distribuição global (Fig. 1a) e do continente Sul Americano (Fig. 1b) dos dados de arqueomagnetismo para os últimos dois mil anos. Recorrente à essa precariedade, é de se esperar que a distribuição temporal desses dados também não seja homogênea. Na Figura 2 os dados são apresentados em um histograma, de forma a representar sua distribuição temporal. De acordo com a distribuição global representada na Figura 2a, a maior quantidade de dados arqueomagnéticos são direcionais, onde há um predomínio de dados de inclinação magnética. Nos dados de intensidade, observa-se que o período com menor quantidade se encontra em aproximadamente 1000 AD.

Na América do Sul há o predomínio de dados de intensidade (figura 2b). Avaliando de forma detalhada observa-se que as pequenas quantidades de dados de intensidade encontram-se entre 0-300 AD e também por volta de 800 AD, e a maior quantidade entre

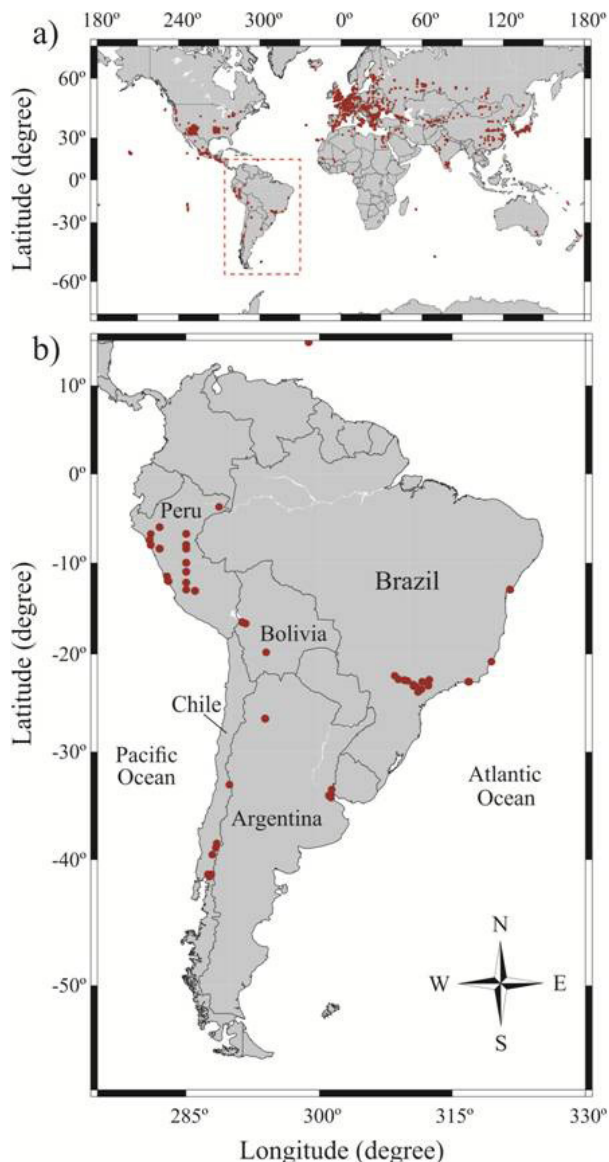


Figura 1. Mapas da distribuição dos dados de arqueointensidade para os últimos dois mil anos. a) Dados mundiais e b) Dados da América do Sul. O retângulo pontilhado vermelho representa a porção reescalada do mapa.

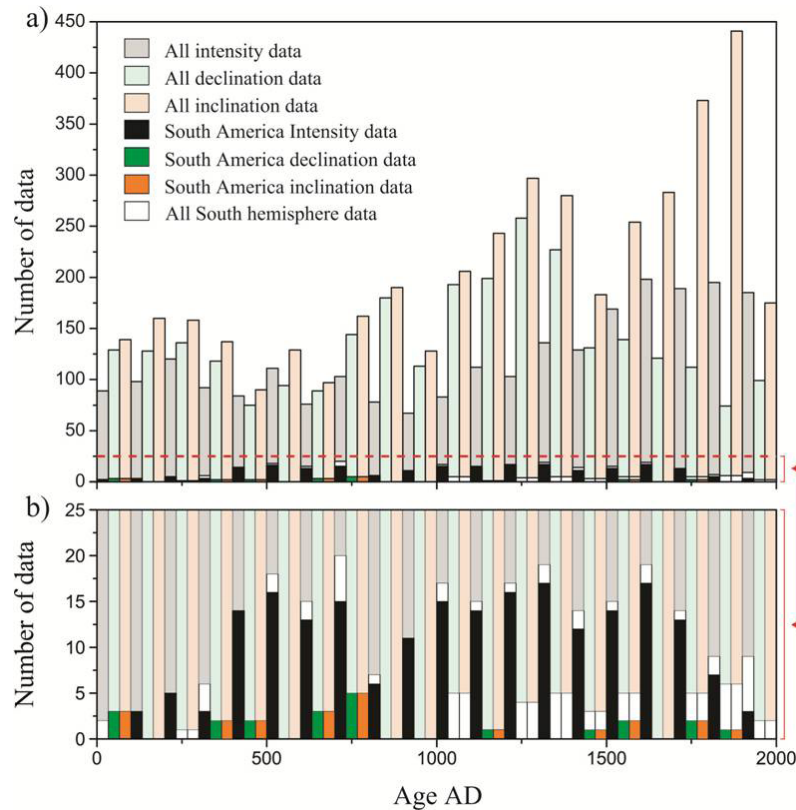
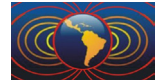


Figura 2. Histograma dos dados de arqueointensidade para os últimos dois mil anos. a) Dados mundiais. b) Reescala do histograma enfatizando os dados da América do Sul.

aproximadamente 400-700 AD, e a partir de 1000 AD. Isso reforça que além de poucos dados para a América do Sul, sua distribuição temporal não é constante, ou seja, há períodos em que o campo magnético para essa região do globo é completamente desconhecido, sendo inferido apenas através dos modelos de campo.

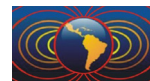
Apenas com a comparação apresentada acima fica evidente que no panorama atual existe uma escassez de dados arqueomagnéticos para a América do Sul, no entanto, essa proporção ainda não representa a real contribuição do continente Sul-Americano. Devido aos critérios atuais de tratamento e seleção de dados (*e.g.*, Paterson *et al.*, 2012; 2014), e das correções metodológicas (*e.g.*, Poletti *et al.*, 2013), uma parcela significativa dos dados dessa porção do globo não representam o campo geomagnético da época em que o material utilizado nas medições foi confeccionado. A seguir será apresentada uma reavaliação dos dados existentes para a América do Sul.

3. Reavaliação dos dados arqueomagnéticos da América do Sul

A reavaliação dos dados arqueomagnéticos da América do Sul para os últimos dois mil anos proposta aqui será dividida em três partes: i) avaliação dos critérios metodológicos utilizados em laboratório para obtenção dos dados; ii) avaliação dos critérios estatísticos para os dados que foram selecionados após a primeira avaliação; iii) apresentação do panorama atual dos dados para a América do Sul após as avaliações propostas.

3.1. Avaliação dos critérios metodológicos

Inicialmente foram selecionados todos os dados de arqueomagnetismo existentes para a América do Sul, totalizando 220 dados provenientes de quinze trabalhos. Os dados de todos os trabalhos foram reanalisados



individualmente, de modo que para essa análise foram levados em consideração os seguintes itens: material analisado; investigação da mineralogia; métodos e protocolos utilizados; aplicação de pTRM *check* (Coe *et al.*, 1978) e pTRM *tail check* (Riisager e Riisager, 2001); e correções (obrigatórias) para o método escolhido (anisotropia termorremanente e *coolin-rate*).

Primeiramente, os dados obtidos através do método Shaw (Gunn e Murray, 1980) e do método Gages (1977), que na prática tem como base o método Shaw, foram rejeitados. De acordo com os atuais critérios de seleção, os dados obtidos a partir desses métodos não podem ser utilizados na representação do campo magnético, visto que há tanto problemas metodológicos quanto estatísticos no tratamento dos dados (Valet e Herrero-Bervera, 2000). Os dados obtidos com a utilização do método de microondas (Shaw *et al.*, 1996) também foram rejeitados. Atualmente sabe-se que o método de microondas aquece as amostras na maioria dos casos, sujeitando-as a possíveis alterações (Poletti *et al.*, 2013). Por essa razão, ao empregar esse método é obrigatório que se faça os passos de pMRT *check* e a correção da taxa de resfriamento (Poletti *et al.*, 2013). Em relação aos dados obtidos através do método Thellier-Thellier, é obrigatório a aplicação dos pMRTs *check*, bem como as aplicações das correções de anisotropia e de *cooling-rate*. Sendo assim, foram rejeitados os dados referentes aos trabalhos de Kono *et al.* (1986), Yang *et al.* (1993), Lee (1975), Nagata *et al.* (1965), Kitazawa e Kobayashi (1968), Goguitchaichvili *et al.* (2011; 2012; 2015).

Os demais dados, obtidos nos trabalhos de Hartmann *et al.* (2010; 2011) e Roperch *et al.* (2014; 2015) foram aprovados após a aplicação dos critérios de seleção metodológica, sendo selecionados para a avaliação dos critérios estatísticos atuais. Apesar dos dados de Goguitchaichvili *et al.* (2011; 2012) apresentarem um problema básico, porém grave, na correção de anisotropia, visto que eles tentaram corrigir desvios vetoriais a partir de médias aritméticas, eles serão avaliados nos critérios estatísticos. Os dados do trabalho recém publicado por Goguitchaichvili *et al.* (2015) também serão avaliados, embora tenham sido rejeitados por calcular o fator de correção de anisotropia em amostras irmãs. Outro erro grave, uma vez que para materiais arqueológicos a anisotropia não é constante para todo artefato (Veitch *et al.*, 1984).

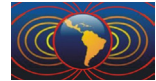
3.2. Avaliação dos critérios estatísticos

A avaliação dos critérios estatísticos dos dados selecionados, realizada nesse trabalho, não será seletiva, embora seja indispensável nos moldes atuais para a publicação de novos dados. Após o trabalho de Paterson *et al.* (2014), onde eles testaram todos os parâmetros estatísticos publicados que asseguram que o valor obtido em laboratório representa o campo magnético do passado, ficou implícita a obrigatoriedade de se definir de forma clara quais parâmetros serão utilizados e o porquê, bem como a apresentação detalhada dos resultados de cada parâmetro. Por exemplo, no caso de se utilizar o *software* ThellierTool4 (Leonhardt *et al.*, 2004), os parâmetros avaliados serão: N, f, β , q, MAD, α , δ CK, δ pal e δ TR (detalhes em Paterson *et al.*, 2012). No caso de outros *softwares* serem utilizados para análise dos dados, como por exemplo, PICRIT03 (Kissel e Laj, 2004) ou SELCRIT2 (Biggin *et al.*, 2007), os parâmetros implementados neles deverão ser avaliados e apresentados de acordo com os valores propostos por Paterson *et al.* (2014).

Entre trabalhos selecionados para a avaliação dos critérios estatísticos, observou-se que apenas as publicações de Hartmann *et al.* (2010; 2011) apresentaram uma definição clara do *software* utilizado para os cálculos dos parâmetros, bem como a apresentação dos resultados. Por esse motivo, para a análise proposta aqui, foram utilizados os parâmetros apresentados em Leonhardt *et al.* (2004) modificado por Paterson *et al.* (2014).

3.3. Panorama atual dos dados arqueomagnéticos da América do Sul para os últimos dois mil anos

Conforme mencionado acima, atualmente a América do Sul possui cerca de 3.9% dos dados arqueomagnéticos para os últimos dois mil anos. Para efeito de comparação, um gráfico do momento de dipolo axial virtual (VADM - *virtual axial dipole moment*) em função do tempo, foi plotado utilizando todos os dados existentes,



com destaque para os dados que tiveram os parâmetros estatísticos avaliados (Figura 3). Em adicional aos dados, foi plotado o modelo de campo CALS10k.1b (Korte *et al.*, 2011), para comparação local entre dados e modelo.

No gráfico da Figura 3 observa-se que a compilação de todos dados existentes não permite entender o comportamento do campo magnético dessa região para os últimos dois mil anos, visto que não há qualquer padrão ou tendência, exceto pela queda do momento a partir de aproximadamente 1700 AD. Fato esse que é justificado pela má qualidade da maioria dos dados.

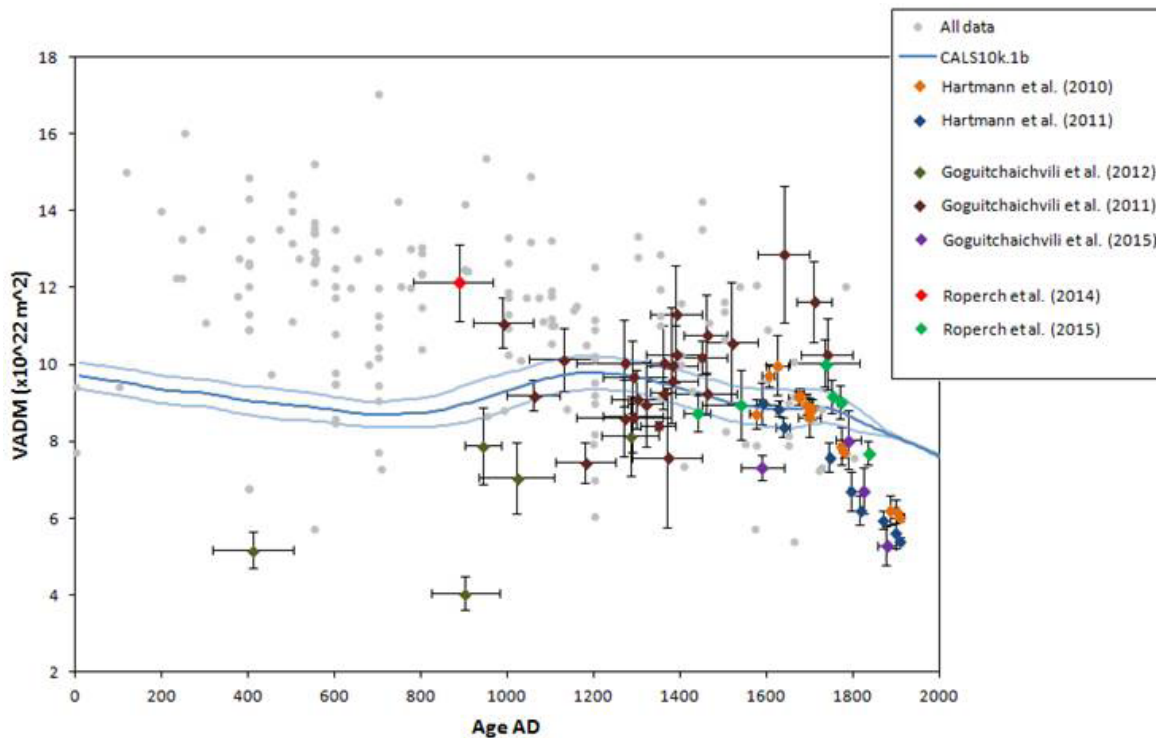


Figura 3. Gráfico do VADM em função do tempo de todos os dados da América do Sul para os últimos dois mil anos e o modelo CALS10k.1b

Utilizando os critérios de seleção propostos nesse trabalho, foram plotados os gráficos da figura 4, onde na figura 4a estão os dados aprovados na seleção dos critérios metodológico e os publicados em Goguitchaichvili *et al.* (2011; 2012; 2015), e na Figura 4b estão apenas os dados aprovados na seleção dos critérios metodológico.

Na Figura 4a observa-se que entre 0 e 800 AD restou apenas um dado após as reavaliações. Por volta de 900-1000 AD há divergências ($\sim 8 \times 10^{22} \text{ A.m}^2$) entre os dados de Roperch *et al.* (2014) e Goguitchaichvili *et al.* (2012), e também entre os dados de Goguitchaichvili *et al.* (2011) e Goguitchaichvili *et al.* (2012) ($\sim 5 \times 10^{22} \text{ A.m}^2$). Entre aproximadamente 1000-1700 AD há um acúmulo de dados que permite diversas interpretações, tais como aumento, diminuição e oscilação do VADM. A partir de 1700 AD é possível observar de forma mais clara uma diminuição do VADM.

Na Figura 4b, onde apenas estão representados os dados aprovados por esse trabalho, observa-se que entre 0 e 1400 AD há apenas um ponto ($\sim 900 \text{ AD}$) que apresenta um valor de VADM maior do que os demais pontos. Entre aproximadamente 1450-1650 AD é possível observar que o VADM se manteve constante, e, por fim, a partir de 1650 AD ele apresenta um decréscimo constante.

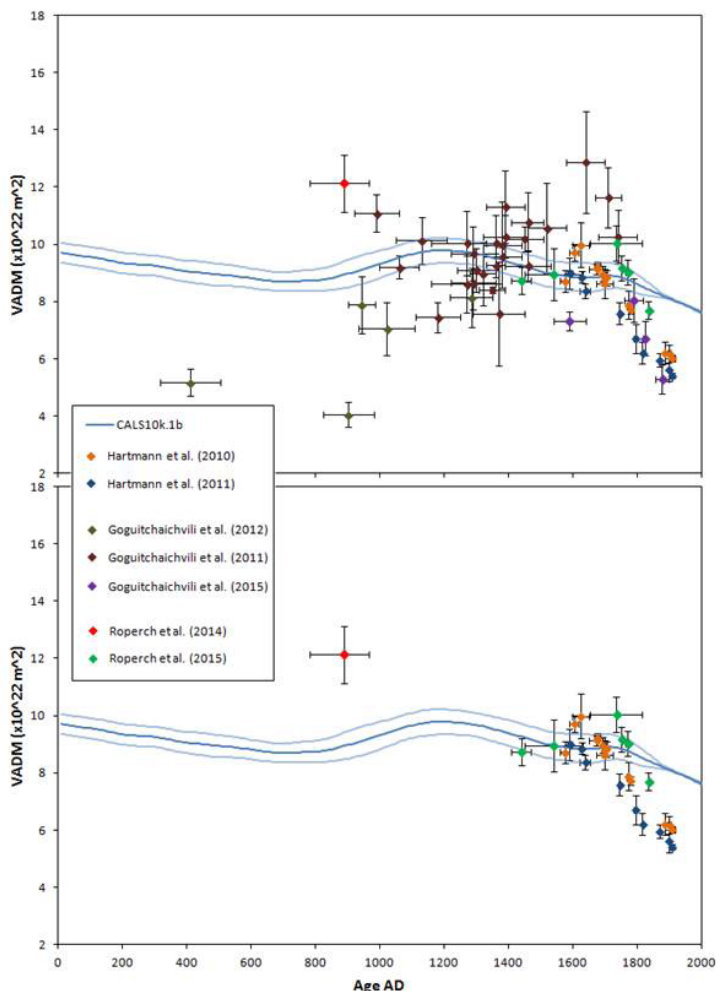
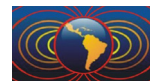


Figura 4. Gráficos do VADM em função do tempo dos dados da América do Sul para os últimos dois mil anos e o modelo CALS10k.1b. a) Dados que foram utilizados na análise dos parâmetros estatísticos e b) Dados aprovados após aplicação dos critérios propostos nesse trabalho.

4. Conclusão

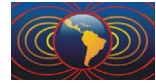
Embora a redução dos dados avaliados tenha sido considerável (de 3.9% para 1.1% dos dados mundiais), por conta dos critérios aplicados nesse trabalho, ficou muito claro que houve a exclusão das ambiguidades existentes. A partir desse ponto, fica proposto que os dados rejeitados devem ser reanalisados experimentalmente de forma a se enquadrar nos critérios aplicados nesse trabalho, uma vez que alguns deles foram rejeitados por pequenos detalhes. Outra implicação direta dessa revisão, é a proposta para obtenção de dados arqueomagnéticos para os períodos de maior carência de informações do campo magnético (Fig. 4b).

Agradecimentos

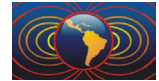
Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro referente ao projeto 2013/16382-0

Referências

Biggin, A. J., Perrin, M., Dekkers, M. J., 2007. A reliable absolute palaeointensity determination obtained from a non-ideal recorder. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 257, 545–563



- Coe, R. S., Grommé, C. S., Mankinen, E. A., 1978. Geomagnetic paleointensities from radiocarbon dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific non-dipole low. *J. Geophys. Res.*, 83, 1740-1756.
- de Groot, L.V., Biggin, A. J., Dekkers, M. J., Langereis, C. G., Herrero-Bervera, E., 2013. Rapid regional perturbations to the recent global geomagnetic decay revealed by a new Hawaiian record. *Nat. Commun.*, 4, 2727.
- Donadini, F., Korte, M., Constable, C. G., 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka: 1. New data sets for global modeling. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 6, Q06007.
- Games, K. P., 1977. The magnitude of the palaeomagnetic field: a new non-thermal, non-detrital method using Sun-dried bricks. *Geophys. J. of the Royal Astro. Soc.*, 48, 315-329.
- Genevey, A., Gallet, Y., Constable, C. G., Korte, M., Hulot, G., 2008. ArcheoInt: An upgraded 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.
- Goguitchaichvili, A., Greco, C., Morales, J., 2011. Geomagnetic field intensity behavior in South America between 400 AD and 1800 AD: First archeointensity results from Argentina. *Phys. Earth planet. Inter.*, 186, 191-197.
- Goguitchaichvili, A., Loponte, D., Morales, J., Acosta, A., 2012. The archaeointensity of the Earth's magnetic field retrieved from Pampean ceramics (South America). *Archaeometry*, 54, 2, 388-400.
- Goguitchaichvili, A., Morales, J., Schavelzon, D., Vásquez, C., Gogorza, C. S. G., Loponte, D., Rapalini, A., 2015. Variations of the Earth's magnetic field strength in South America during the last two millennia: New results from historical buildings of Buenos Aires and re-evaluation of regional data. *Earth planet. Int.*, 245, 15-25.
- Gunn, N. M., Murray, A. S., 1980. Geomagnetic field magnitude variations in Peru derived from archaeological ceramics dated by thermoluminescence. *Geophys. J. of the Royal Astro. Soc.* 62, 345-366.
- Hartmann, G. A., Genevey, A., Gallet, Y., Trindade, R. I. F., Le Goff, M., Najjar, R., Etchevarne, C., Afonso, M. C., 2011. New historical archeointensity data from Brazil: Evidence for a large regional non-dipole field contribution over the past few centuries. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 306, 66-76.
- Hartmann, G. A., Genevey, A., Gallet, Y., Trindade, R. I. F., Etchevarne, C., Le Goff, M., Afonso, M.C., 2010. Archeointensity in Northeast Brazil over the past five centuries. *Phys. Earth Planet. Sci. Lett.*, 296, 340-352.
- Kissel, C., Laj, C., 2004. Improvements in procedure and paleointensity selection criteria (PICRIT- 03) for Thellier and Thellier determinations: Application to Hawaiian basaltic long cores. *Phys. Earth Planet. Int.*, 147, 155-169
- Kitazawa, K., Kobayashi, K., 1968. Intensity variations of the geomagnetic field during the past 4000 years in South America. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 20, 7-19.
- Kono, M., Ueno, N., Onuki, Y., 1986. Paleointensities of the geomagnetic field obtained from Pre-Inca potsherds near Cajamarca, Northern Peru. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 38, 1339-1348.
- Korte, M., Constable, C., Donadini, F., Holme, R., 2011. Reconstructing the Holocene geomagnetic field. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 312, 497-505.
- Lee, S., 1975. Secular variation of the intensity of the geomagnetic field during the past 3000 years in North, Central and South America. PhD Thesis. University of Oklahoma, USA, Norman, 200 pp.
- Leonhardt, R., Heunemann, C., Krasa, D., 2004. Analyzing absolute paleointensity determinations: Acceptance criteria and the software ThellierTool4.0. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5, Q12016.
- Nagata, T., Kobayashi, K., Schwarz, E. J., 1965. Archeomagnetic intensity studies of South and Central America. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 17, 399-405.



- Paterson, G. A., Biggin, A. J., Yamamoto, Y., Pan, Y., 2012. Towards the robust selection of Thellier-type paleointensity data: The influence of experimental noise. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13, 5, Q05Z43.
- Paterson, G. A., Tauxe, L., Biggin, A. J., Shaar, R., Jonestrask, L. C., 2014. On improving the selection of Thellier-type paleointensity data. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15.
- Poletti, W., Hartmann, G. A., Hill, M. J., Biggin, A. J., Trindade, R. I. F., 2013. The cooling-rate effect on microwave archeointensity estimates. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3847-3852.
- Roperch, P., Chauvin, A., Lara, L. E., Moreno, H., 2015. Secular variation of the Earth's magnetic field and application to paleomagnetic dating of historical lava flows in Chile. *Phys. Earth Planet. Int.*, 242, 65-78.
- Roperch, P., Chauvin, A., Le Pennec, J. L., Lara, L. E., 2014. Paleomagnetic study of juvenile basaltic-andesite clasts from Andean pyroclastic density current deposits. *Phys. Earth Planet. Int.*, 227, 20-29.
- Shaw, J., Walton, D., Yang, S., Rolph, T. C., Share, J. A., 1996. Microwave archaeointensities from Peruvian ceramics. *Geophys. J. Int.*, 124, 241-244.
- Terra-Nova, F., Amit, H., Hartmann, G. A., Trindade, R. I. F., 2015. The time-dependence of reversed archeomagnetic flux patches. *J. Geophys. Res.*, 120, 2, 691-704.
- Valet, J-P., Herrero-Bervera, E., 2000. Paleointensity experiments using alternating field demagnetization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 177, 43-58.
- Veitch, R., Hedley, I., Wagner, J. J., 1984. An investigation of the intensity of the geomagnetic field during Roman times using magnetically anisotropic bricks and tiles. *Arch. Sci.*, 37, 359-373.
- Yang, S., Shaw, J., Rolph, T., 1993. Archaeointensity studies of Peruvian pottery -
- Yang, S., Shaw, J. and Rolph, T. (1993). Archaeointensity studies of Peruvian pottery - from 1,200 B.C. to 1,800 A.D.. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45, 1,193-1,207.