

George Caminha-Maciél

A Geometria do Campo Paleomagnético

sua descrição em Harmônicos Esféricos

1ª Edição

São Paulo

Edição do Autor

2010

ISBN 978-85-911134-0-8

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Geofísica

A Geometria do Campo Paleomagnético

George Caminha-Maciél

Monografia apresentada como Exame de Qualificação de Doutorado

Setembro/2006

Índice

<i>O Campo Paleomagnético.....</i>	<i>1</i>
<i>Uma Nota sobre Funções Ortogonais e Expansões .</i>	<i>12</i>
<i>Análise em Harmônicos Esféricos.....</i>	<i>18</i>
<i>Harmônicos Esféricos $Y_{lm}(\theta, \phi)$.....</i>	<i>23</i>
<i>Teorema da Adição, para Harmônicos Esféricos... </i>	<i>28</i>
<i>Ajustando aos Dados.....</i>	<i>31</i>
<i>O modelo do “Giant Gaussian Process (GGP)”</i>	<i>39</i>
<i>Dados do Campo Atual versus Dados Paleomagnéticos.....</i>	<i>42</i>
<i>Buscando Geometrias de Transição Recorrentes... </i>	<i>43</i>
<i>Conclusões.....</i>	<i>47</i>
<i>Referências e Bibliografia.....</i>	<i>52</i>

O CAMPO PALEOMAGNÉTICO

O campo magnético da Terra é um vetor, isto é, uma grandeza física definida pela magnitude e direção. A unidade da magnitude ou intensidade do campo no sistema SI é o Tesla (T), sendo que, para medidas geofísicas usa-se o nanotesla ($1\text{nT}=10^{-9}\text{ T}$), compatível com a ordem das variações observadas nas medidas usuais do campo em superfície (campo principal $\sim 6.10^{-5}\text{T}$).



Figura 1. A aurora polar é um fenômeno óptico caracterizado por um brilho observado nos céus noturnos em regiões próximas a zonas polares. Decorre do impacto de partículas de vento solar e poeira espacial (principalmente elétrons) encontrados na Via Láctea contra a alta atmosfera da Terra ($\sim 100\text{km}$ de altitude), canalizadas pelo campo magnético terrestre e ocorre na forma de uma emissão de luz (uma cortina de cor verde ou rósea) bem parecida com uma descarga elétrica. O fenômeno não é exclusivo à Terra, é também observado em outros planetas do sistema solar como Júpiter, Saturno, Marte e Vênus. Sendo também um fenômeno reproduzível artificialmente, através de explosões nucleares ou em laboratório (Foto: Picture of the Year 2006).

Usa-se também o Gauss ($1\text{G} = 10^{-4}\text{ T}$) e o gama ($1\gamma = 10^{-9}\text{ T} = 1\text{nT}$).

O vetor campo magnético terrestre é naturalmente definido como três componentes cartesianas paralelas a um conjunto de eixos ortogonais. Usualmente definimos os elementos geomagnéticos como as projeções do campo nas direções para o Norte geográfico, para Leste e, verticalmente, para baixo, (X_{NS} , Y_{EW} , $Z_{\text{p/Baixo}}$).

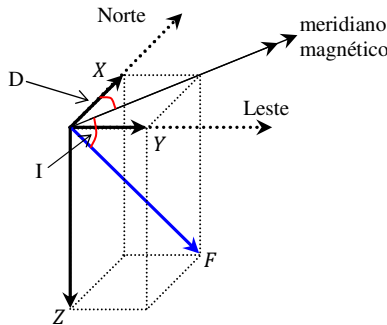


Figura 2. O vetor campo magnético em coordenadas geográficas e esféricas

Observe-se que neste caso, as duas primeiras direções possuem vetores diretores contidos no plano tangente à esfera, no ponto de observação considerado (meridiano e paralelo geográfico). Também podemos defini-lo em coordenadas esféricas, a *intensidade* representando a componente radial, e

dois ângulos, a *declinação magnética*, ângulo entre o vetor campo magnético e o meridiano geográfico, e a *inclinação magnética*, ângulo entre o vetor campo magnético e a normal ao plano tangente (para dentro da esfera), no ponto considerado, **(F, D, I)**.

As duas representações relacionam-se através das fórmulas:

$X = F \cos I \cos D$	$F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$
$Y = F \cos I \sin D$	$D = \arctg(Y/X)$
$Z = F \sin I$	$I = \arctg(Z/\sqrt{X^2 + Y^2})$

As análises do campo atual em harmônicos esféricos, a partir de dados dos observatórios magnéticos e satélites, mostram um dipolo e componentes não-dipolares variando lentamente com o tempo. O dipolo apresenta uma deriva para Oeste à taxa de 0,044-0,14°/ano, o que corresponde a um circuito completo a cada 2500-8000 anos. O campo não-dipolar apresenta uma deriva para Oeste à taxa de 0,022-0,66°/ano, o que corresponde a um circuito completo a cada 550-1650 anos. Lembremos que estes resultados baseiam-se em dados dos últimos 400 anos, não cobrindo o tempo relativo a um circuito

completo e, portanto, não possuindo conteúdo de informação necessária para confirmar a ciclicidade e estimar um período completo. Registros anteriores do campo geomagnético podem ser obtidos através dos métodos do Arqueomagnetismo e do Paleomagnetismo.

Arqueomagnetismo é o estudo do campo geomagnético registrado em artefatos históricos datáveis. Note-se que, em alguns casos, as idades de artefatos históricos como fornos e tijolos, podem ser obtidas com grande precisão e confiabilidade. Os fornos e tijolos foram, em geral, “cozidos” adquirindo uma magnetização (magnetização termorremanente - TRM) ao resfriar. A direção da magnetização pode ser medida e, se a atitude do vaso durante o aquecimento (e resfriamento) puder ser estimada, a inclinação do antigo campo ambiente é deste modo determinada. Uma técnica desenvolvida por Thellier em 1937 permite estimar a intensidade do antigo campo ambiente (paleointensidade) a partir da TRM adquirida pelo artefato (ou fragmento de rocha), assumindo ser esta somente devida a um dipolo. Obviamente esta hipótese não é inteiramente justificável, especialmente no caso do arqueomagnetismo, quando sabemos que o tempo de resfriamento do artefato é relativamente curto, não permitindo eliminarem-se, no tempo, as componentes não-dipolares do

campo local. Estimativas a partir de dados arqueomagnéticos sugerem uma ciclicidade de 1300 anos para uma volta completa, com uma taxa média de deriva para Oeste de $0,38^\circ/\text{ano}$, mais rápida que a deduzida a partir de dados de observatórios magnéticos e satélites.

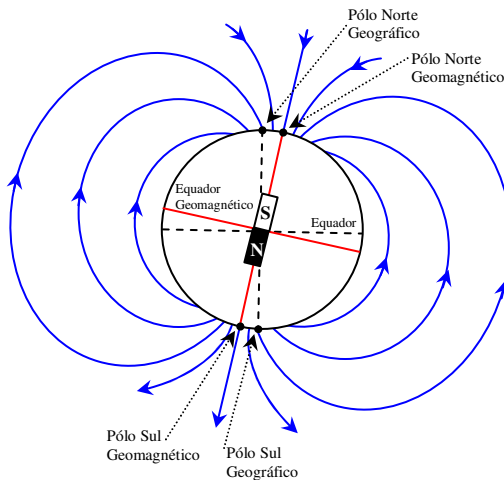


Figura 2. Campo dipolar terrestre, que representa 99% do campo total e está inclinado aproximadamente 12° em relação ao eixo geográfico.

Paleomagnetismo é o estudo do campo geomagnético registrado nas rochas. A hipótese fundamental do método paleomagnético é a de que o campo geomagnético, na média para intervalos de tempo longos, corresponde a um dipolo geocêntrico axial. Deve-se esclarecer que a média, neste caso, refere-se à posição média dos “dipolos virtuais” inferidos a

partir das direções de magnetização medidas. A hipótese do **dipolo geocêntrico axial (DGA** ou em inglês **GAD**), apoia-se em análise de variações de longo período em dados de observatórios e observações paleomagnéticas em lavas jovens e sedimentos.

Neste ponto devemos lembrar algumas definições úteis: ***Variação Secular*** é o conjunto das oscilações do campo geomagnético, com periodicidades superiores a algumas dezenas de anos; ***Pólos magnéticos*** são os pontos, na superfície terrestre, onde as linhas do campo magnético medido apresentam-se perpendiculares à superfície; ***Pólos Geomagnéticos*** são os pontos, na superfície terrestre, onde o eixo do dipolo geocêntrico de melhor ajuste aos dados do campo atual cruza a superfície; ***Pólos Geomagnéticos Virtuais (PGVs)*** são os pólos geomagnéticos inferidos a partir de uma única medida pontual (no espaço e, aparentemente, também no tempo). Para se obter o PGV deve-se supor que a magnetização medida na rocha foi devida a um campo puramente dipolar.

A deriva para Oeste do campo dipolar implica em mudanças sistemáticas nas componentes equatoriais do dipolo. Se as mudanças são aproximadamente cíclicas, a média (de longo período) da intensidade dos componentes equatoriais do dipolo seria zero, dentro de algumas dezenas de milhares de