Geomagnetismo

Introdução

Histórico

O interesse pelo magnetismo teve início na observação das propriedades de atração magnética do mineral *lodestone*, uma forma de ocorrência da magnetita. Não é possível saber em qual época tais observações foram feitas, pois não há um registro preciso. Sabe-se que os filósofos gregos já haviam escrito sobre a magnetita no ano 800 a.C., e os chineses já conheciam suas propriedades por volta do ano 300 a.C.. Aproximadamente no século V a.C., os chineses já sabiam que a agulha da bússola não apontava exatamente para o norte geográfico. À esta diferença entre o meridiano magnético e o meridiano geográfico chamamos *declinação*.

O estudo do geomagnetismo teve início com a carta escrita pelo soldado Pierre Pélerin de Maricourt, adotando o pseudônimo de Petrus Peregrinus, conhecida como *Epistola de Magnete* e considerada o primeiro tratado de física experimental. Esta carta foi escrita pelo soldado durante uma operação militar no ano de 1269. Neste trabalho são descritas leis simples sobre atração magnética, obtidas em um experimento realizado com uma esfera esculpida em magnetita. Com a esfera flutuando na água sobre uma tábua e fixando finas lâminas de ferro na superfície da esfera, Petrus traçou as linhas de direção que o ferro assumia, observando que elas circundavam a esfera e convergiam para dois pontos antipodais aos quais chamou de pólos magnéticos, em analogia aos pólos geográficos.

No século XIV os navios da marinha britânica eram equipados com instrumentos de navegação usados em conjunto com a astronomia. Conforme os marinheiros navegavam tornou-se evidente que a declinação variava com a posição no globo. Entre os séculos XV e XIV, período das grandes navegações, estabeleceu-se valores de declinação para o mundo todo. No fim do século XVI, Mercator reconheceu que a declinação era o principal fator de erro nos mapas contemporâneos.

Em 1544, Georg Hartmann, um religioso alemão, verificou que uma agulha magnetizada assume uma direção não-paralela em relação à vertical, este ângulo de desvio é chamado de *inclinação*.

Como conseqüência do crescente interesse pelo magnetismo e geomagnetismo, *De Magnete* foi publicado em 1600, por William Gilbert, importante trabalho, considerado o primeiro tratado científico mais próximo dos modelos atuais. Este tratado reúne todo o conhecimento científico que havia até a época, incluindo resultados de pesquisas do próprio Gilbert. Assim como Petrus Peregrinus, Gilbert utilizou pequenas agulhas magnéticas dispostas na superfície de uma esfera de magnetita para estudar o campo magnético da esfera. Desta forma, reconheceu os pólos, onde as agulhas ficavam perpendiculares à superfície da esfera, e o equador onde permaneciam tangentes. Gilbert observou a semelhança entre a atração na esfera de magnetita e as propriedades magnéticas conhecidas da Terra, reconhecendo que a própria Terra comporta-se como um ímã. Este foi, então, o primeiro reconhecimento de uma propriedade geofísica, precedendo as leis de gravitação de Newton em quase um século.

Posteriormente, em 1634, o matemático e astrônomo inglês, Henry Gellibrand baseado em três observações: William Borough, 1580; Edmund Gunter, 1622; e uma observação própria em 1634, notou que o valor de declinação em certo local havia diminuído de aproximadamente 7˚ neste período, ao que ele chamou de *variação secular do campo*.

Um passo importante nas pesquisas do geomagnetismo foi a implementação de um programa de colaboração científica internacional, organizado por Carl Friedrich Gauss, promovendo a padronização de instrumento e métodos de medida e observação e reunindo os dados de todos os observatórios geomagnéticos.

Princípios físicos

No eletromagnetismo são considerados dois campos magnéticos, denotados por $\vec{B}$ e $\vec{H}$. O vetor B refere-se à indução magnética e H à intensidade do campo magnético. A relação B=miH permite que se escolha qualquer um dos dois, porém, em 1973, a IAGA

(Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia) recomendou que o campo geomagnético fosse expresso pelo campo $\vec{B}$.

As leis do magnetismo foram estabelecidas associando-se o campo B a pontos imaginários de concentração de força magnética, chamados pólos magnéticos. Gauss provou que um pólo magnético simples não existe, isto é, um pólo positivo está sempre em par com um pólo negativo. A forma mais comum do campo magnético (e componente dominante do campo geomagnético) é o campo atribuído a um *dipolo magnético*, que é o campo dois pólos de sinais opostos, bastante próximos um do outro. As origens do campo geomagnético dipolar são abordadas mais adiante.

A princípio, o c.g.s. era o sistema de unidades utilizado em estudos geomagnéticos, porém, foi determinado pela IAGA que fosse utilizado o sistema internacional (SI). Assim, nos dois sistemas têm-se:

	c.g.s.	**SI**
B	gauss	tesla (T) = 10^4 gauss
H	oersted (Oe)	A/m = $4\pi 10^{-3}$ (Oe)

Elementos geomagnéticos

O campo geomagnético é um vetor, ou seja, apresenta intensidade e direção. Cada ponto na superfície da Terra pode ter o vetor geomagnético como na Figura 1.

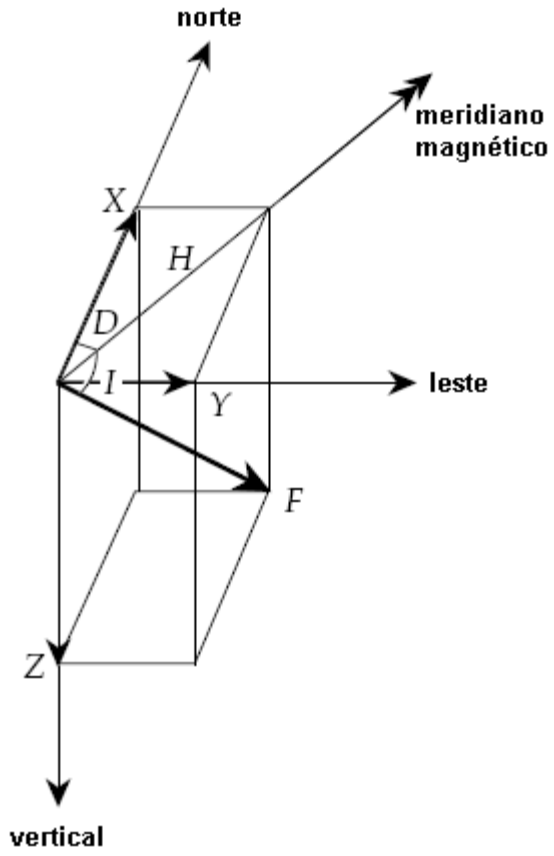

Figura 1 – Os elementos geomagnéticos podem ser expressos através das coordenadas cartesianas: norte (X), leste (Y) e vertical (Z), ou pelos ângulos de declinação (D) e inclinação (I) e a intensidade do campo (F).

Os elementos geomagnéticos (X, Y, Z) são tomados de forma que sejam paralelos às direções norte, leste e vertical para baixo. Outra representação é a forma polar em que os ângulos de declinação (D) e inclinação (I) expressam a direção do vetor geomagnético e o vetor F é a magnitude do campo. As relações matemáticas entre essas duas representações são expressas da seguinte maneira:

$$\begin{cases} X = F \cdot \cos I \cdot \cos D \\ Y = F \cdot \cos I \cdot senD \\ Z = F \cdot \cos I \end{cases}$$

$$\begin{cases} F^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \\ D = arctg\left(\dfrac{Y}{X}\right) \\ I = arctg\left(\dfrac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right) \end{cases}$$

A intensidade $\vec{F}$ do campo é medida em *tesla* (T), entretanto, a máxima intensidade do campo geomagnético ocorre nos pólos e é da ordem de 10^{-5}T. Os magnetômetros modernos têm precisão de medida da ordem de 10^{-9}T (ou NT) então esta é a unidade adotada em geofísica.

A forma espacial do campo geomagnético

Como apresentado por Gilbert, o campo magnético da Terra pode ser descrito como dipolar com as linhas de campo emanando do pólo sul geomagnético e convergindo para o pólo norte geomagnético.

Embora essa descrição seja útil para muitos fins, não é muito precisa. Pois há uma pequena parte do campo que não é dipolar, essas duas componentes somadas são o campo superficial total.

Sobre os pólos magnéticos o vetor campo magnético tem direção vertical, portanto, o ângulo de inclinação é 90°. Este ângulo diminui até zero no equador magnético. O pólo norte magnético localiza-se no Ártico Canadense, nas coordenadas 78°N e 104°W, o sul geomagnético é localizado no Oceano Antártico ao sul da Austrália, a 65°S e 138°E. Nota-se, pelas coordenadas, que os pólos geomagnéticos não são antipodais, o que significa não diametralmente simétricos, além disso, o campo dipolar apresenta uma inclinação de ~11° com o eixo de rotação da Terra. Então, a melhor representação para o campo magnético terrestre é a de um dipolo cujo eixo está deslocado de cerca de 490 km em relação ao centro da Terra, chamado dipolo excêntrico (Figura 3).

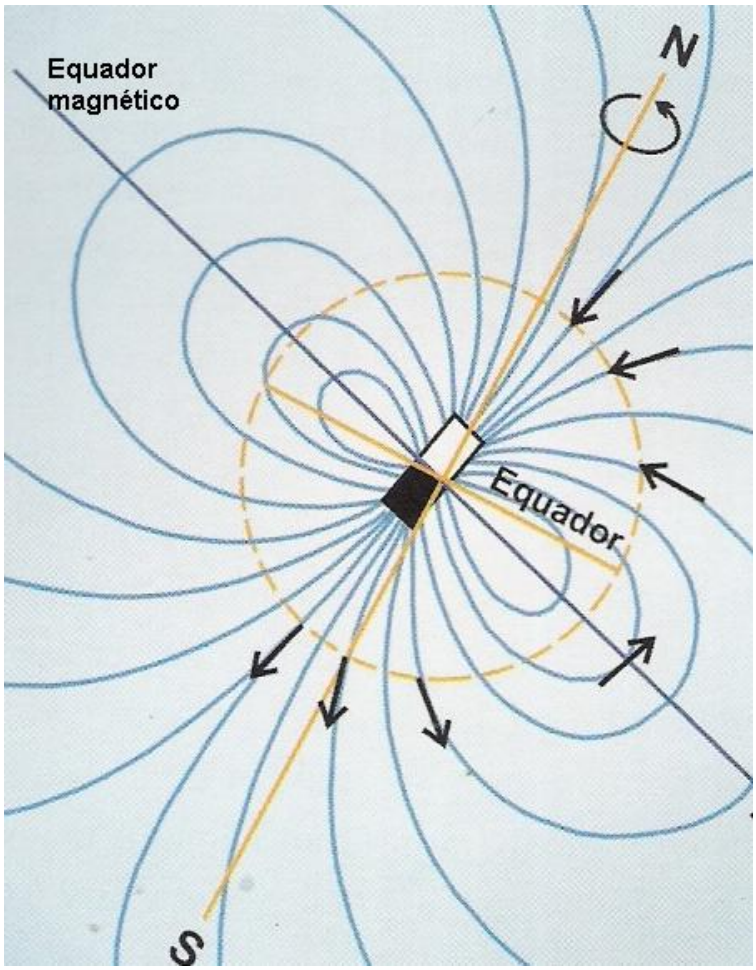

Figura 2 – Representação do campo magnético dipolar. (Fonte: *Decifrando a Terra*, w. Teixeira et al., 2000)

Origens do campo magnético terrestre

O campo geomagnético considerado dipolar é gerado por correntes elétricas em diferentes partes da Terra, podendo ser decomposto em componentes interna e externa: a primeira, e principal, tem origem no núcleo externo; a segunda tem origem na ionosfera e no exterior da Terra.

O campo interno

A parte mais significativa do campo é gerada pelo movimento do fluido condutor presente no núcleo externo, em um processo semelhante ao de um dínamo.

A composição do interior da Terra é determinada através de dados sísmicos e geoquímicos. No núcleo externo, o principal constituinte é ferro líquido, havendo também pequenas porções de elementos menos densos. Análises geoquímicas de meteoritos de ferro sugerem que a composição do núcleo externo deva ter uma pequena porcentagem de níquel, enquanto investigações sísmicas apontam para a presença (6 - 10%) de elementos mais leves como enxofre, sílica e oxigênio. O núcleo interno, por sua vez, é sólido e os estudos indicam que seja praticamente inteiro de ferro puro.

Estudos paleomagnéticos em rochas indicam que o campo geomagnético existe há pelo menos 3.5 bilhões de anos e sem algum tipo de processo regenerativo que balanceie a perda de corrente elétrica através da disspação ôhmica, o campo teria se extinguido em apenas 15000 anos.

Parâmetros importantes para a geração do campo magnético são temperatura, viscosidade e condutividade elétrica. Os valores de temperatura não são bem conhecidos no interior da Terra, mas estima-se que ultrapassem 3000˚C no núcleo externo. A condutividade estimada para o ferro em altas temperaturas e pressões varia entre 3 e $5 \times 10^5 \Omega^{-1} m^{-1}$.

O núcleo externo comporta-se como um gerador elétrico natural, onde a energia cinética de convecção é convertida em energia eletromagnética, através da diferenciação química e do calor gerado pela radioatividade. Basicamente o que acontece é que quando o fluido condutor move-se através de um campo magnético induz corrente elétrica, tal corrente, por sua vez, gera um campo magnético associado a ela. Dependendo da geometria entre o fluido e o campo gerado, este último pode somar-se ao campo magnético preexistente, neste caso diz-se que o dínamo é auto-sustentável. Esta é a hipótese mais aceita atualmente para a existência do campo geomagnético interno, porém, os detalhes do funcionamento exato do dínamo ainda são temas de muitas pesquisas.

O campo externo

A *magnetosfera* é a região que comporta a porção externa do campo geomagnético, esta área é fortemente influenciada pelo comportamento solar. O Sol emite constantemente uma corrente de partículas eletricamente carregadas, conhecida por *vento solar*. A uma distância de 15 vezes o raio da Terra, o vento solar colide com a atmosfera no lado no planeta que está sendo iluminado pelo Sol, com velocidade entre 300 e 500 km/s. O choque deforma esta região do espaço, definindo o contorno externo da magnetosfera. Após o choque o vento solar se distribui ao redor da Terra, interagindo com a atmosfera numa zona bastante turbulenta.

O movimento das partículas carregadas presentes no vento solar constitui uma corrente elétrica, que possui um campo associado a ela. Este campo pressiona a magnetosfera achatando-a e acentuando a intensidade do campo. No lado em que é noite, as linhas de campo não sofrem essa pressão então a magnetosfera possui uma forma alongada, semelhante à cauda de um cometa, e a intensidade do campo é bem menor que no lado oposto.

Fig. Magnetosfera

A Ionosfera

O campo magnético atua como uma blindagem impedindo que a radiação solar mais violenta atinja a superfície, causando danos à biosfera.

A parte externa do campo geomagnético tem origem na camada mais externa da atmosfera, uma região eletricamente condutora que recebe o nome de *ionosfera*. A ionização desta camada é provocada pela radiação ultravioleta do sol que consegue penetrar a atmosfera, desse modo, o hemisfério iluminado da ionosfera é mais condutor que o hemisfério noturno, gerando fortes correntes elétricas no hemisfério iluminado, num sistema tipo dínamo alimentado pela energia solar.

Variações Temporais do Campo Geomagnético

Variação secular

O mesmo movimento de convecção no núcleo externo que se acredita ser o responsável por sustentar o campo geomagnético da Terra, também faz com que a intensidade do campo varie com o tempo de maneira bastante lenta, porém significativa. Essas mudanças só podem ser percebidas após décadas, ou até mesmo séculos, de observação, então o fenômeno é conhecido como *variação secular*. Em cada ponto da superfície há um valor diferente para a variação, por isso, seu conhecimento depende da observação em vários pontos (estações magnéticas). Também é devido a essa variação do campo que as cartas magnéticas devem ser atualizadas periodicamente.

Os pólos geomagnéticos também mostram variação secular, migrando a uma velocidade de 0.2°/ano ao redor do pólo geográfico, descrevendo uma trajetória irregular que pode ser observada traçando-se a co-latitude e longitude dos pólos ao longo do tempo.

Figura movimento do pólo

Variação diurna

Além de geração do campo geomagnético terrestre, o Sol também atua na ionosfera criando um efeito de maré, em parte devido a atração gravitacional, mas principalmente pelo aquecimento da atmosfera no lado em que está sendo iluminado. O movimento das partículas carregadas ao redor do campo magnético terrestre produz uma força elétrica, que governa as correntes elétricas na ionosfera. Em particular, a componente horizontal da velocidade das partículas interage com a componente vertical do campo, gerando *loops* de correntes elétricas. Estas correntes causam um campo magnético na superfície da Terra, conforme a rotação do planeta a intensidade do campo observada abaixo da ionosfera flutua num intervalo entre 10 e 30 nT na superfície e num período de um dia. Essa variação com o tempo da intensidade do campo magnético recebe o nome de *variação diurna*.

Figura variação diurna

A magnitude da variação diurna depende da latitude de observação, geralmente supera a precisão com que o campo é medido, deve-se então fazer a correção deste valor. Dependendo da intensidade da atividade solar os dias são classificados como calmos, ativos ou perturbados. Nos de maior atividade ocorrem perturbações equivalentes a vários graus na declinação e até 1000 nT em intensidade. Esses distúrbios recebem o nome de *tempestades magnéticas*.

Cartas e Anomalias Magnéticas

Sendo o campo geomagnético variável em cada ponto, a sua distribuição é melhor visualizada em *cartas isomagnéticas*, que são mapas nos quais cada linha une pontos de mesmo valor de determinado parâmetro (inclinação, declinação, intensidade).

Cartas de declinação, inclinação, campo total

Ao observar as cartas percebe-se que o campo geomagnético não possui qualquer relação com a geologia da superfície, evidenciando que sua origem deve ser bastante profunda. O mapa de intensidade total mostra que o campo é mais complicado que a aproximação que se faz por um dipolo geocêntrico. No caso de um campo dipolar as linhas deveriam ser paralelas ao equador do dipolo, exceto próximo aos pólos.

Concentrações de minerais magnéticos presentes nas rochas e algumas correntes elétricas fracas na crosta são as principais fontes de campos pontuais que, em pesquisas mais detalhadas, superpõem o contorno das linhas isomagnéticas. Esses campos recebem o nome de anomalias magnéticas e sua interpretação é o objetivo do método magnético em prospecção geofísica. As anomalias magnéticas são sempre formadas por um par de intensidades positiva e negativa, possuindo seção transversa de 1 até 100 km.

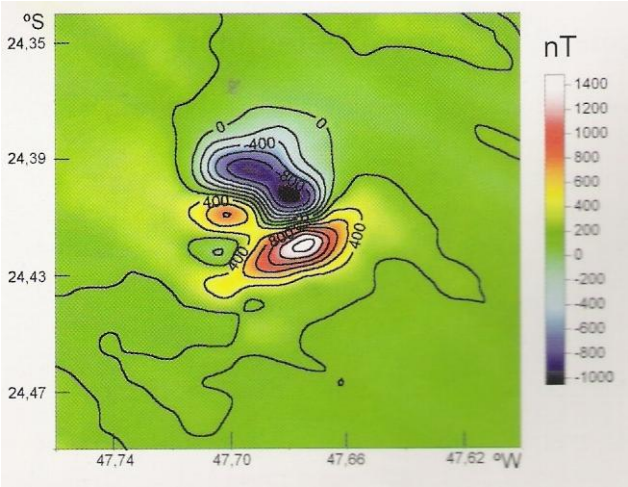

Figura 9 – Exemplo de anomalia magnética de intensidade total, gerada por concentração de minerais magnéticos em corpo ígneo intrusivo. (Fonte: *Decifrando a Terra*, w. Teixeira et al., 2000)