

Campo Magnético da Terra

Yara Marangoni

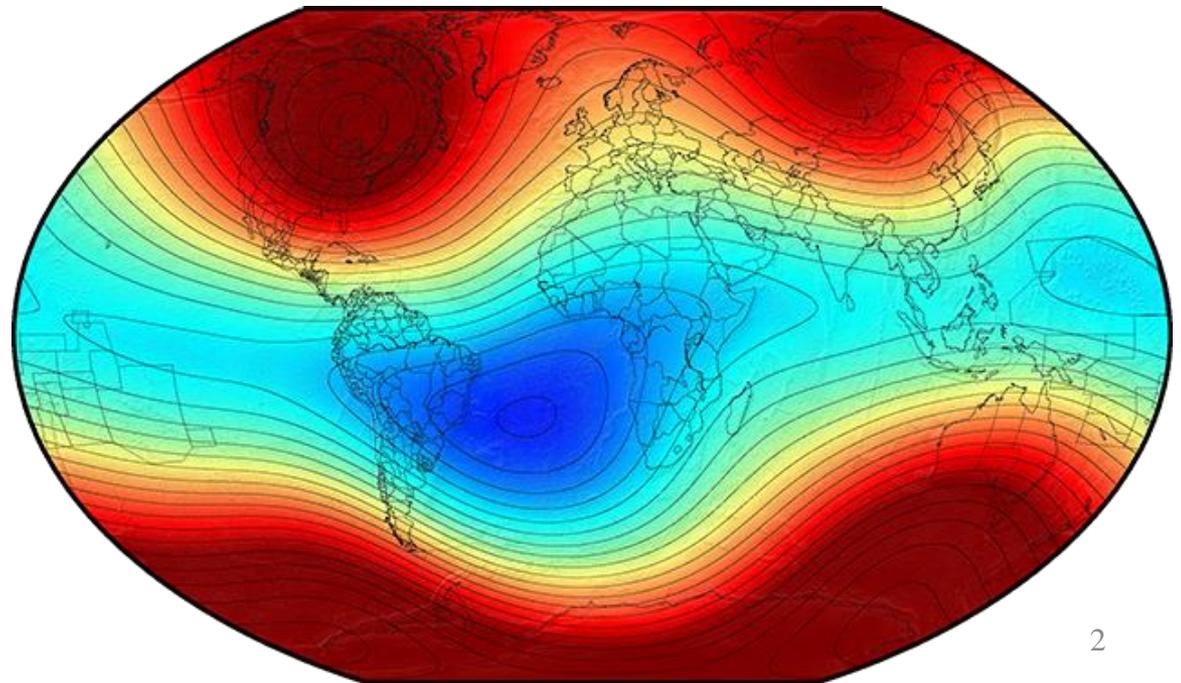
2022

Eder Molina

Pontos iniciais sobre o CMT

- Em Geofísica: campo magnético ambiente é o campo magnético terrestre (CMT).
- CMT: campo planetário, derivado no interior do planeta, conhecido como campo principal ou campo interno.
- O CMT é o campo **B** apresentado anteriormente

Modelo de intensidade do campo geomagnético para 1850



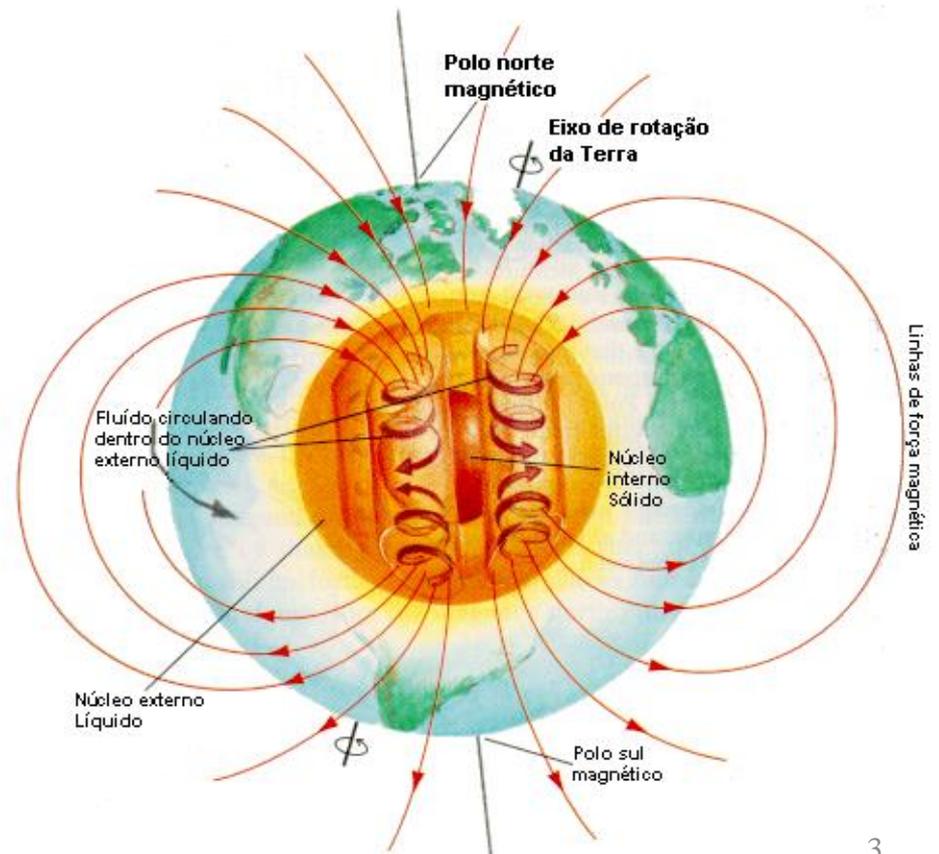
Pontos iniciais sobre o CMT

Geração do campo magnético

Campo magnético da Terra é gerado no núcleo externo líquido de composição metálica (Fe-Ni + algum elemento mais leve).

O núcleo fundido apresenta movimentos convectivos que geram o CMT.

O “motor” da convecção no NE é a diferença de densidade da composição do líquido. Chamamos essa convecção de forçada.
O “motor” da convecção no manto é o calor, que muda a densidade das rochas.



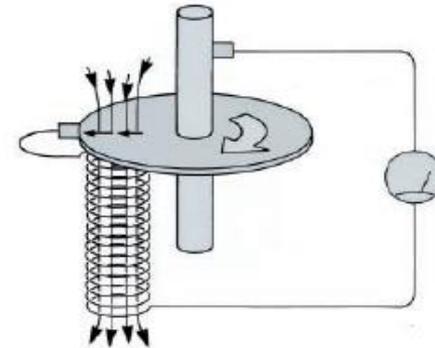
Pontos iniciais sobre o CMT

Geração do campo magnético

A convecção do fluido metálico gera correntes elétricas que produzem o campo magnético.

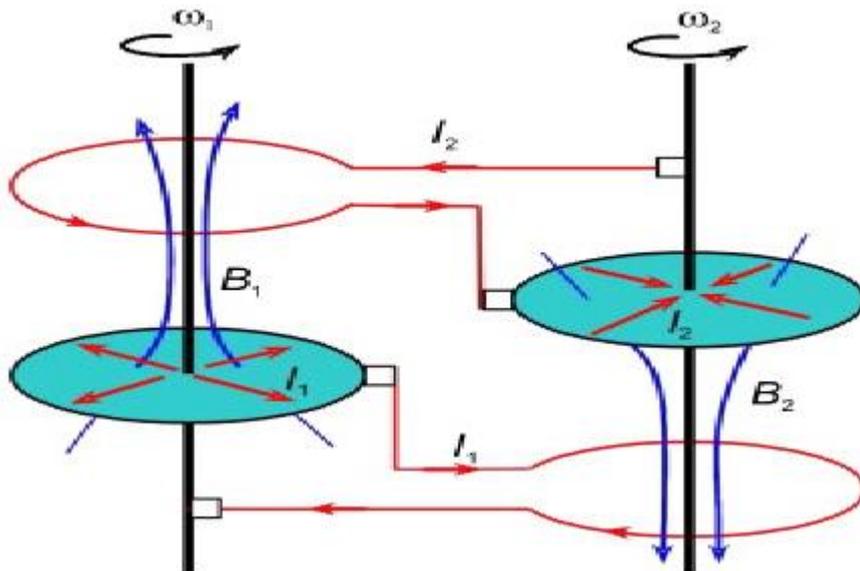
Podemos imaginar o CMT como um dínamo auto excitado.

Rikitake, em 1958, propôs um sistema de dois dínamos acoplados.



(B) Theoretically, convection in Earth's core can generate an electrical current (in a manner similar to the operation of a dynamo), which produces a magnetic field

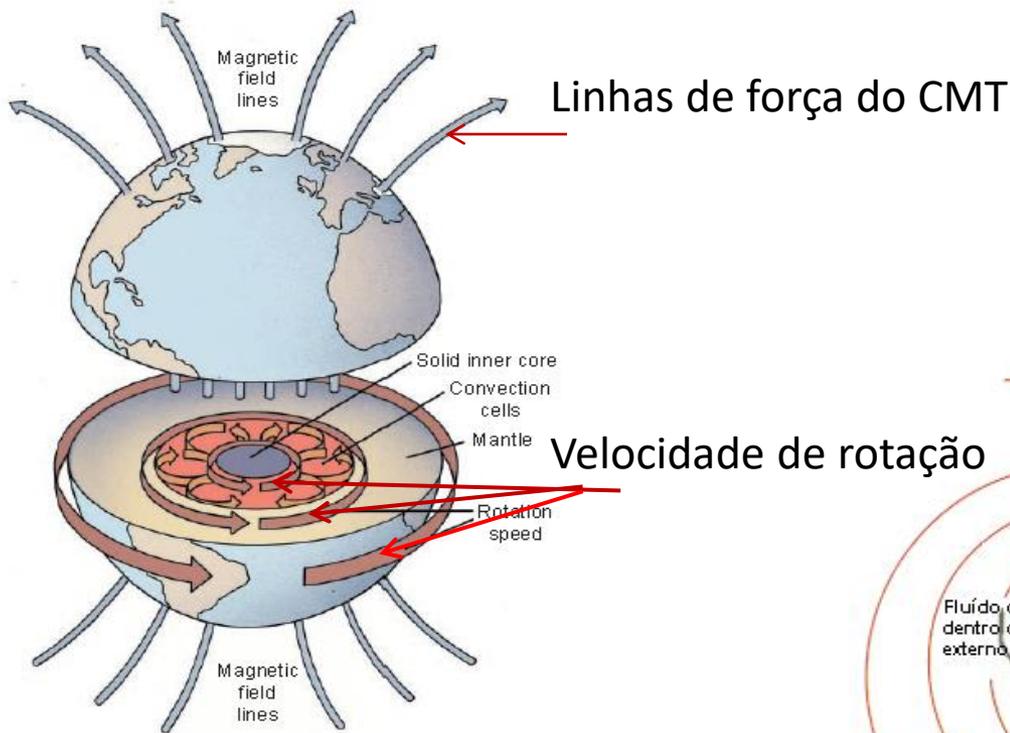
Humblin & Christiansen, 2003



Harb & Ayoub, 2012

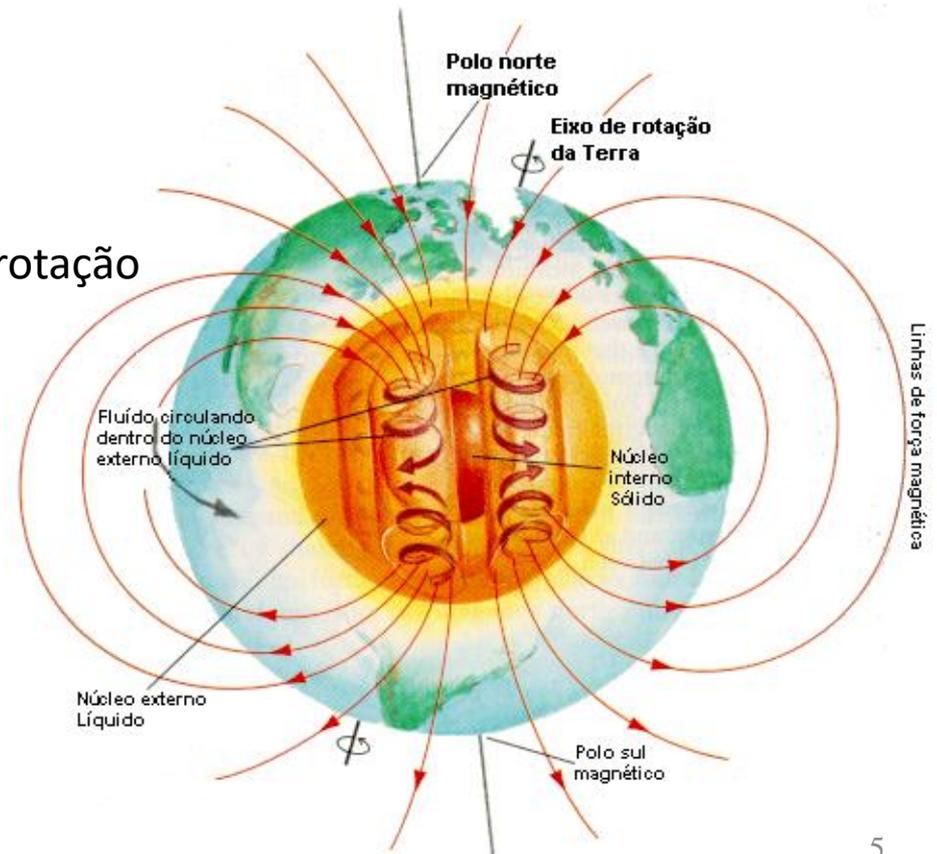
Pontos iniciais sobre o CMT

Geração do campo magnético



(A) Lines of force in Earth's magnetic field are shown by arrows. If a magnetic needle were free to move in space, it would be deflected by Earth's magnetic field. Close to the equator, the needle would be horizontal and would point toward the poles. At the magnetic poles, the needle would be vertical. Field lines are shown for a reverse polarity time period.

Humblin & Christiansen, 2003



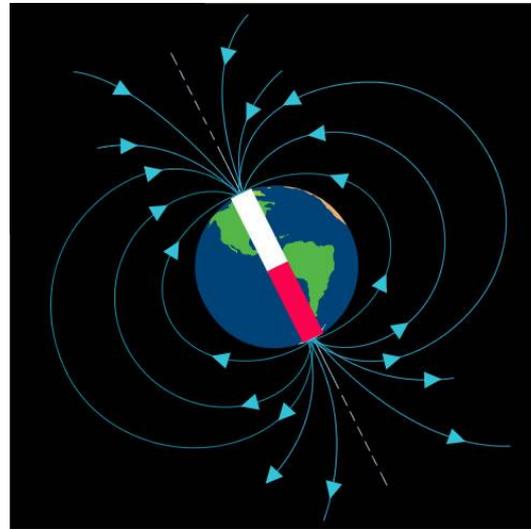
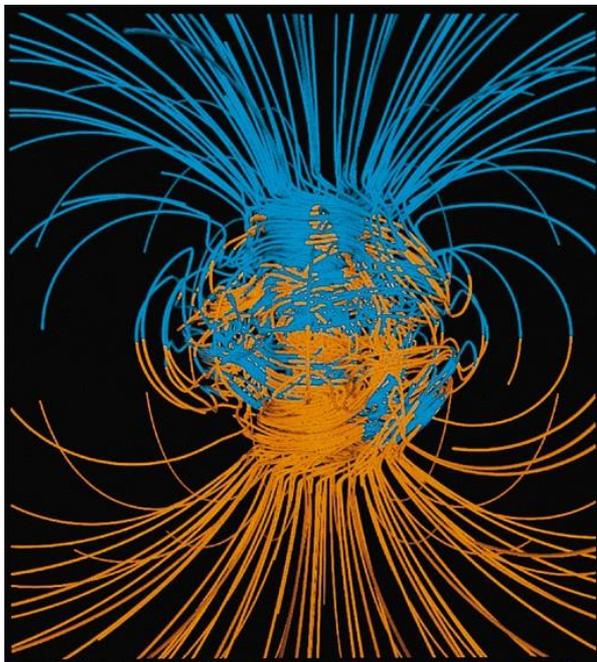
Pontos iniciais sobre o CMT

- Quais são as componentes do campo magnético medido na superfície da Terra?
- Campo principal causado por correntes elétricas associadas a movimentos convectivos no núcleo externo da Terra, que é eletricamente condutor (**B**)
- +
- Componente que é a resposta das variações horizontais (laterais) das propriedades magnéticas na crosta – magnetização induzida, permanente ou não (\mathbf{M}_{ind} e/ou \mathbf{M}_{rem})
- +
- Componente devido às correntes elétricas na ionosfera e na própria Terra.
- =
- **T** a soma é vetorial!

Pontos iniciais sobre o CMT

Configurações do campo magnético

Na interface manto-núcleo, não há características dipolares. Obtido pela solução de equações de Maxwell e de movimento de fluidos (magnetohidrodinâmica)



Aproximadamente dipolar na superfície da Terra, longe da fonte.

Campo externo: interação do campo magnético interno com o vento solar



Caracterização do CMT na superfície

Vetor! 3 elementos:

Componentes X, Y, Z

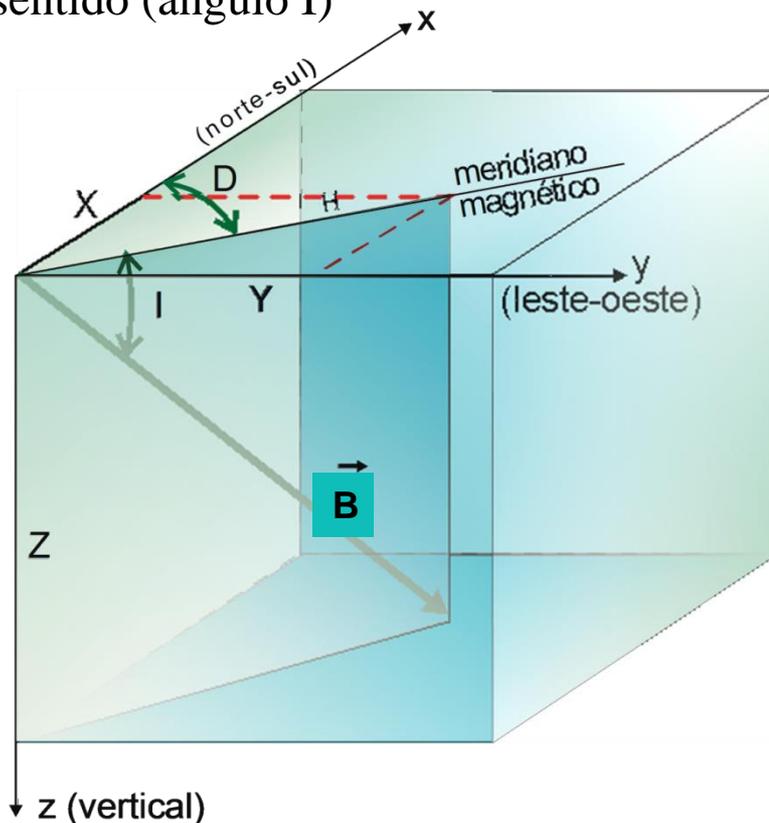
Ou

Magnitude $|\mathbf{B}|$, direção (ângulo D) e o sentido (ângulo I)

I – conhecido como inclinação, é medido na direção vertical a partir do plano horizontal.

Quando \mathbf{B} , campo magnético, é horizontal $I = 0^\circ$, quando $I = \pm 90^\circ$ o campo B é vertical.

D = conhecido como declinação, indica a diferença angular entre o norte geográfico e o meridiano magnético no ponto de medida.



$$\tan D = \frac{Y}{X} \quad \tan I = \frac{Z}{H}$$

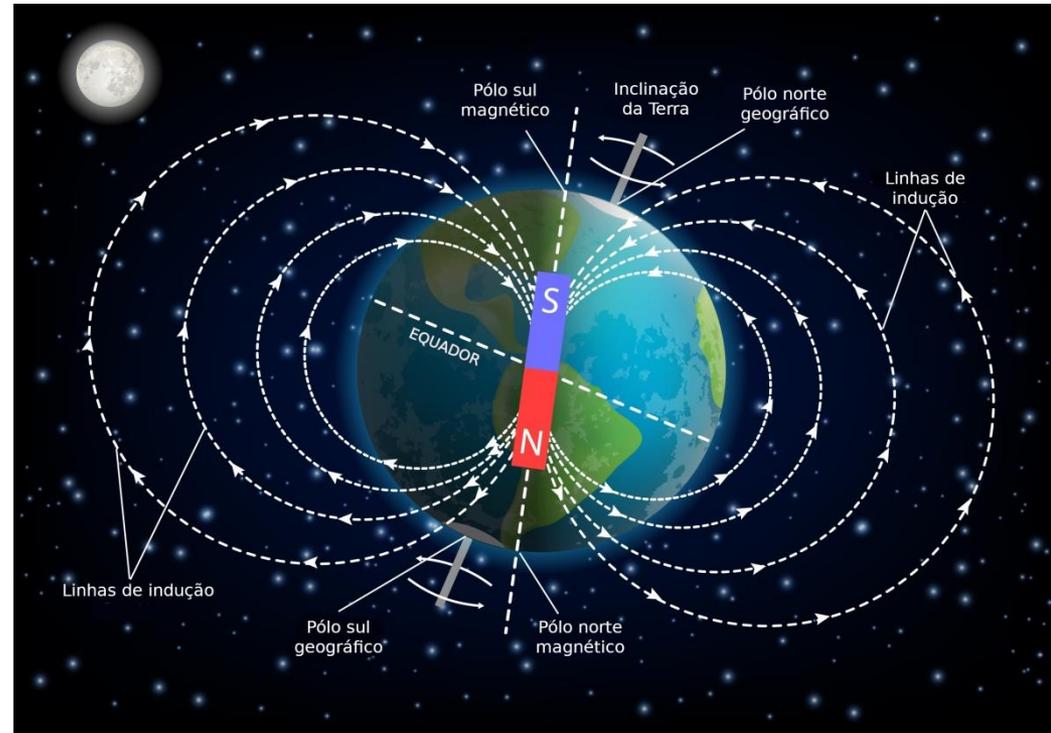
$$|\mathbf{B}| = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad |\mathbf{H}| = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Caracterização do CMT na superfície

A intensidade do campo magnético: cerca de 50.000 nT.

A intensidade menor próximo ao equador (menor quantidade de linhas de força/área) e é maior nos polos (maior quantidade de linhas de força/área), com cerca 60.000nT.

A melhor representação do CMT na superfície é de um dipolo não centrado e não axial. Não centrado: está ligeiramente afastado do centro da Terra. Não axial: o eixo do dipolo faz um ângulo de $11,5^\circ$ com o eixo de rotação da Terra.



Representação dos polos magnéticos da Terra e suas linhas de indução. Ilustração: Siberian Art / Shutterstock.com

<https://www.infoescola.com/fisica/campo-magnetico-da-terra/>

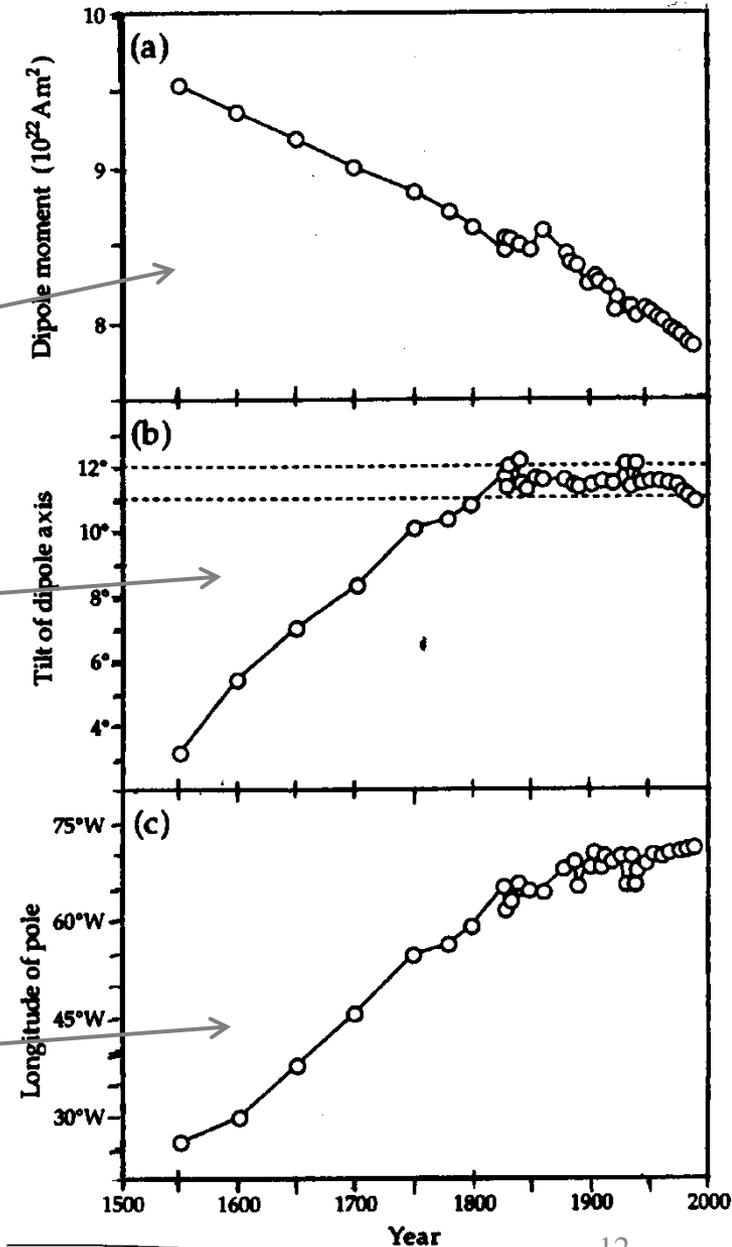
VARIAÇÕES TEMPORAIS DO CMT

Variações do campo magnético

- O CMT apresenta vários tipos de variações:
- Variações das componentes do campo, que são mapeadas como intensidade do campo, declinação e inclinação. Estas variações são medidas diariamente e ajustadas a cada 5 anos.
- São resultados das variações seculares ou de período muito longo, 1800 a 10.000 anos, relacionadas ao campo magnético de origem interna e manifestam-se nas componentes do dipolo e do campo não dipolar.
- Variação diurna: relacionada à interação do vento solar com o CMT
- Tempestades magnéticas, também relacionadas à interação do vento solar com o CMT porém com amplitude e variação muito altas.
- Reversões do CMT, onde a polaridade é revertida com respeito à polaridade atual (chamada de normal).

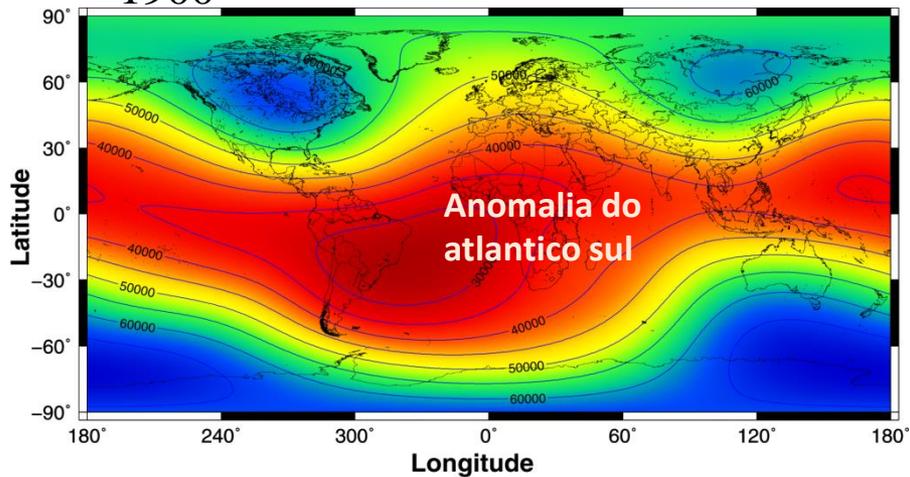
Variações do campo magnético - secular

- Variação secular do dipolo centrado:
- diminuição do momento: de 1550-1900 taxa de $\sim 3,2\%$ por século, de 1900-1980, taxa de $\sim 5,8\%$ por século.
- variação da inclinação do eixo do dipolo com respeito ao eixo de rotação de 1550-1800 aumentou de 3° para 11° , de 1800-1980 $\cong 11^\circ - 12^\circ$ constante;
- deriva para oeste da longitude do polo magnético: o polo gira ao redor do polo geográfico, de 1550-1800 taxa de $0,14^\circ$ por ano - período de rotação ~ 26.000 anos, de 1800-1980 taxa de $0,044^\circ$ por ano, um período de rotação ~ 82.000 anos.

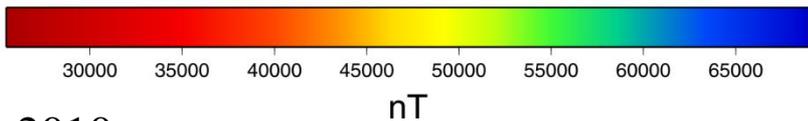


Intensidade do campo total - IGRF

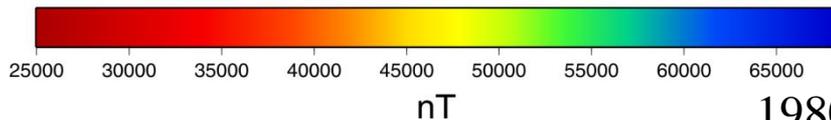
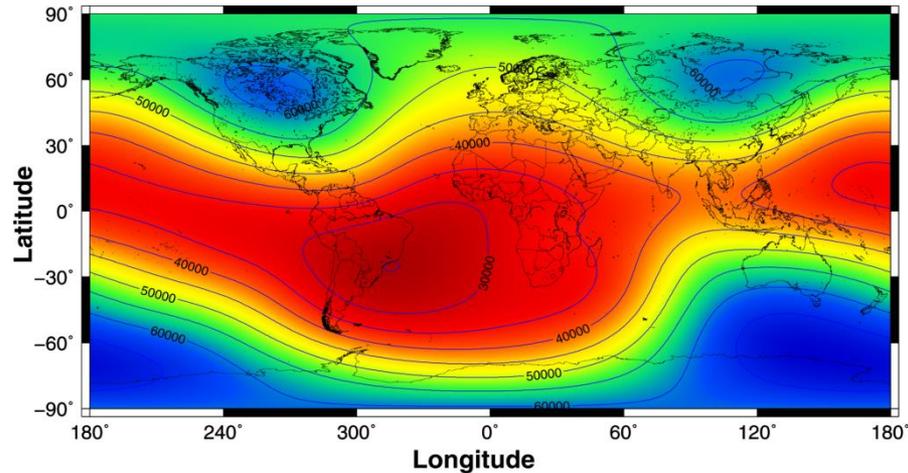
1900



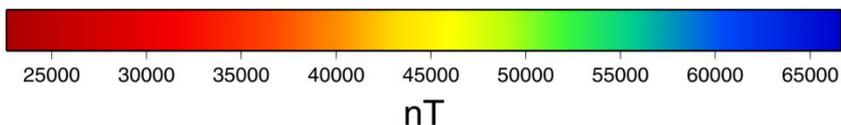
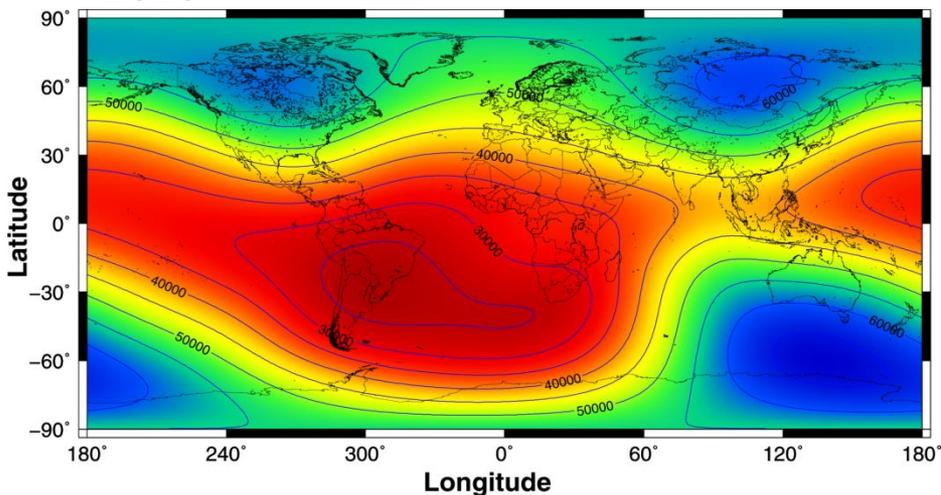
Anomalia do atlantico sul



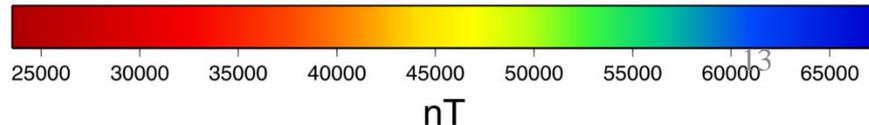
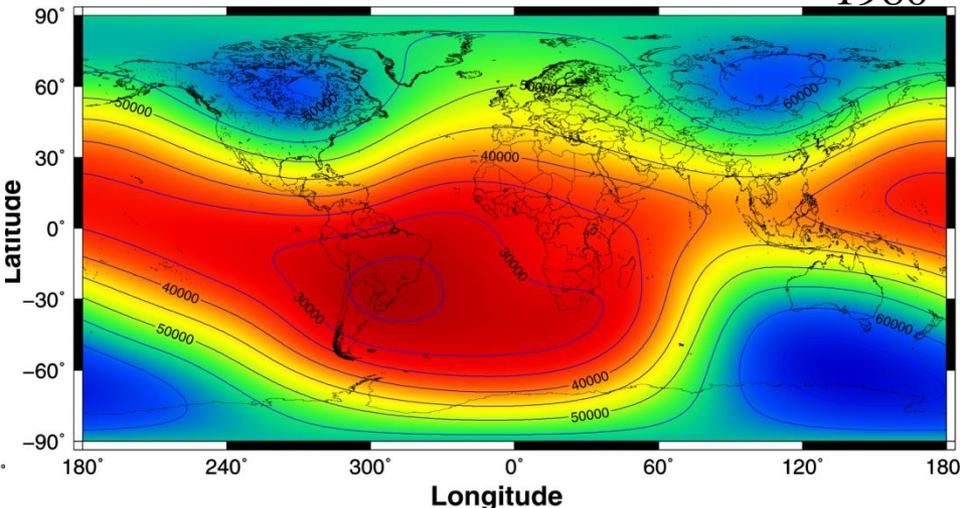
1940



2010

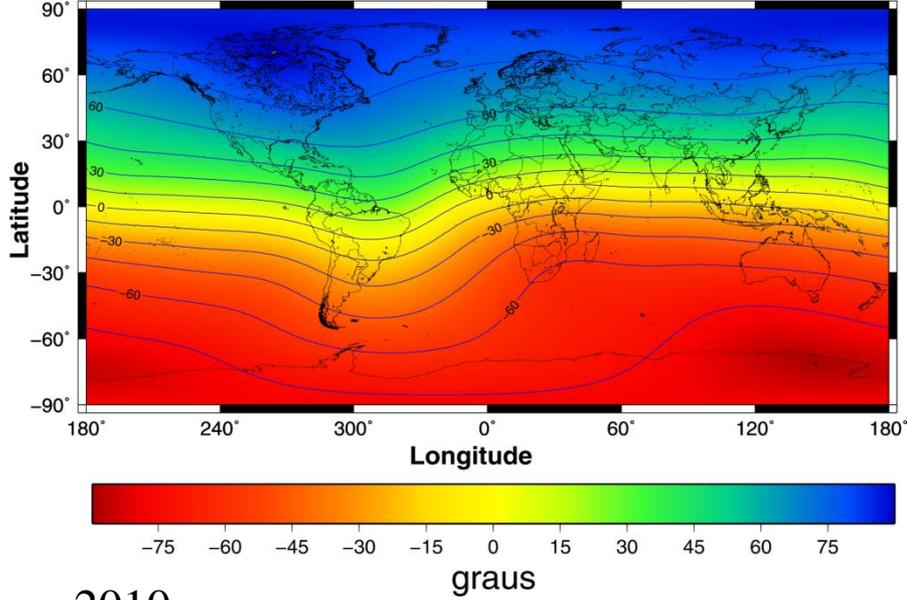


1980

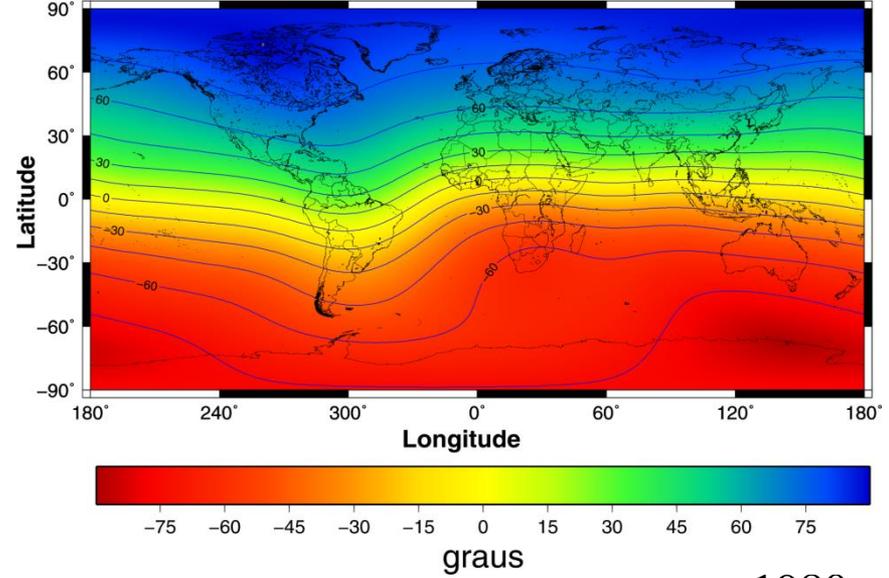


Inclinação do campo total - IGRF

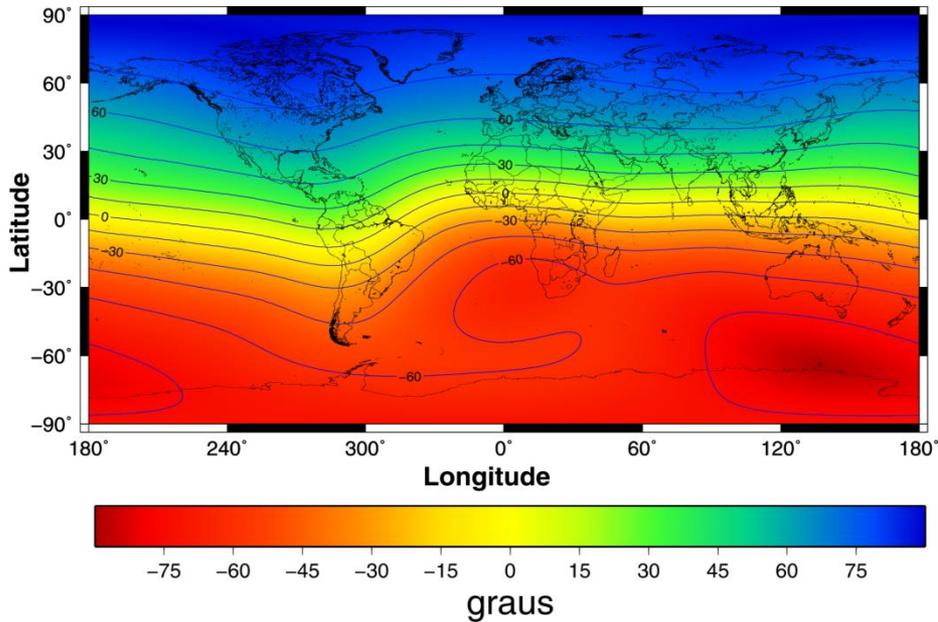
1900



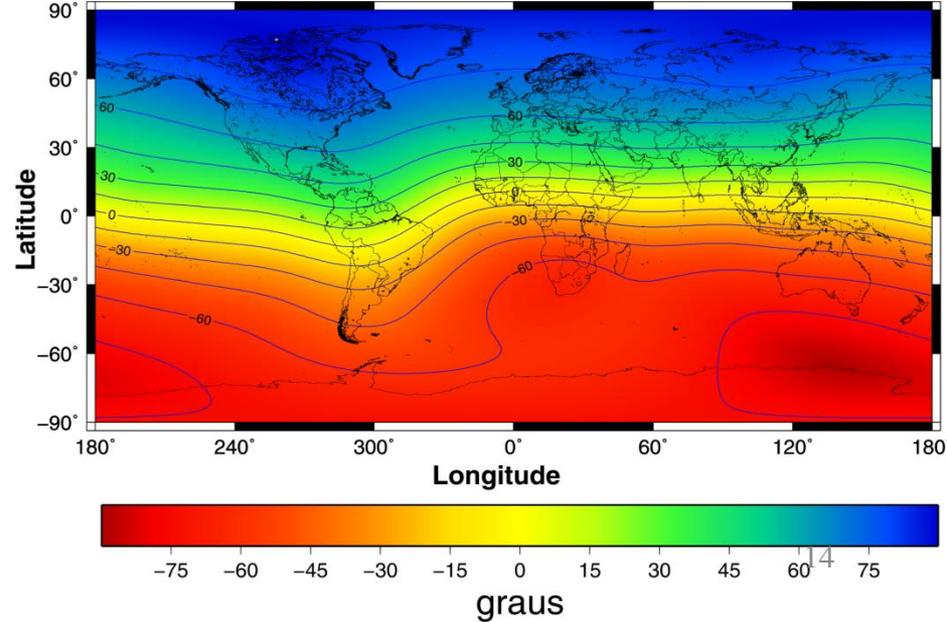
1940



2010

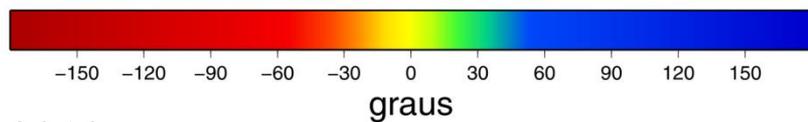
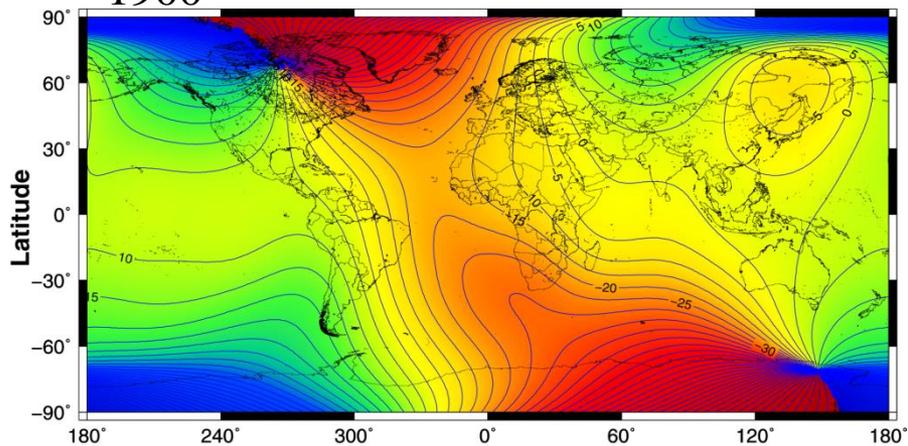


1980

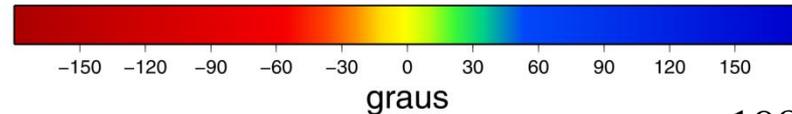
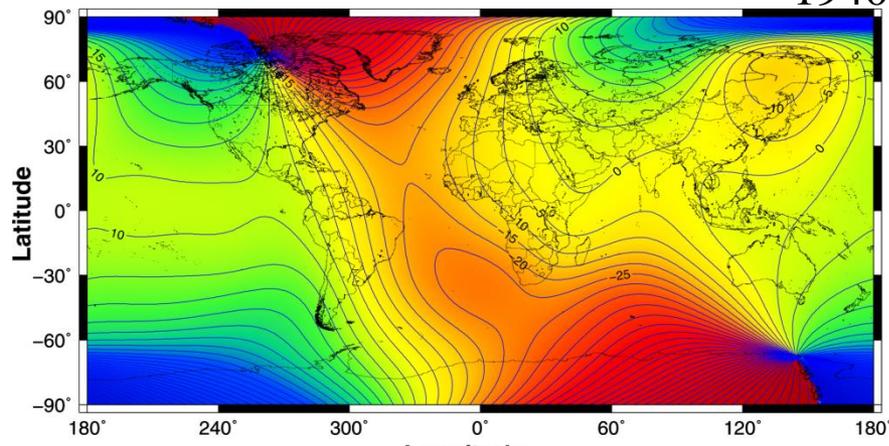


Declinação do campo total - IGRF

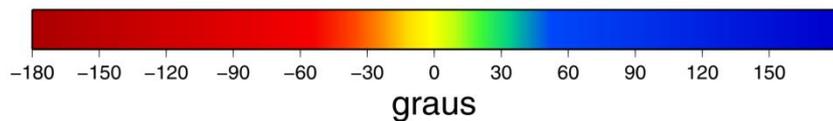
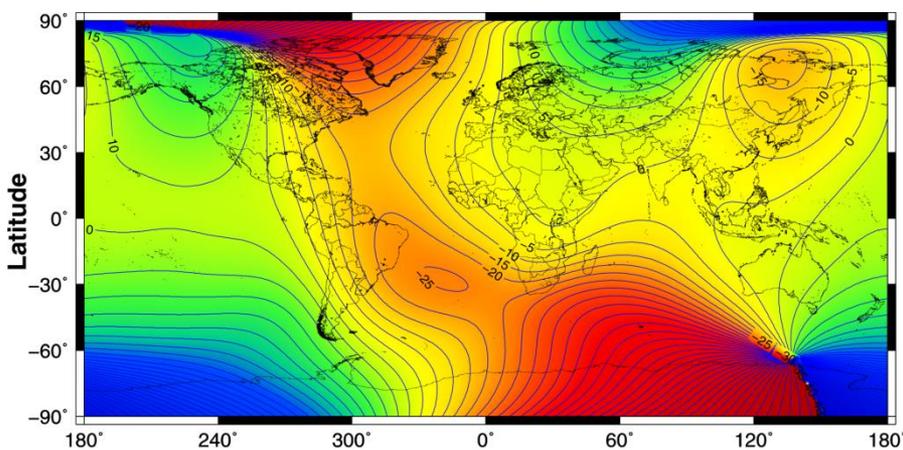
1900



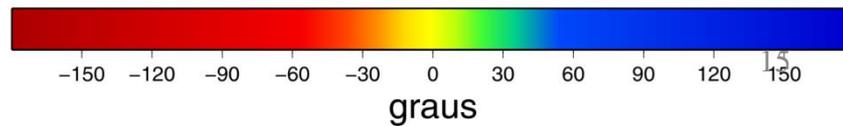
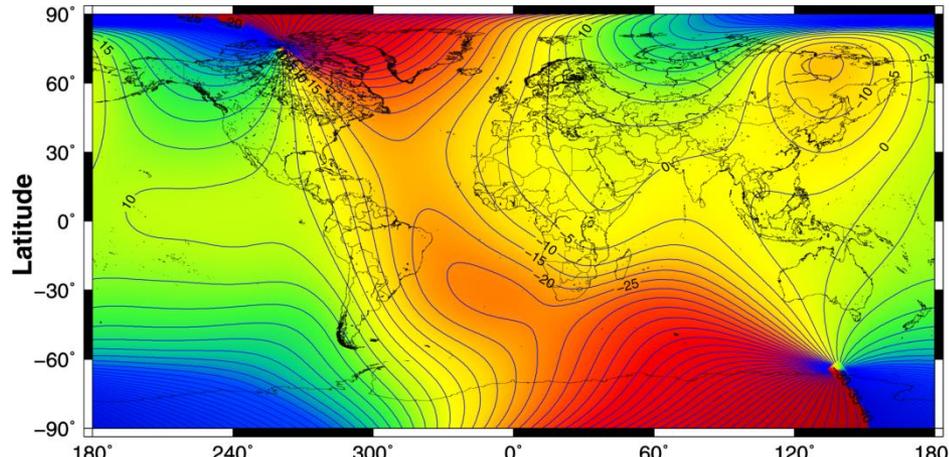
1940



2010



1980



Variações do campo magnético - secular



São nos observatórios geomagnéticos que são feitas medidas constantes do CMT. Essas medidas servem para determinar as variações seculares e também as variações diurnas.



Nos observatórios geomagnéticos as medidas são feitas para as direções X, Y e Z com magnetômetros instalados em cada direção.

Observatório geomagnético de Vassouras (RJ)

Deriva do Polo

Fig. 1 | Historical movement and predicted future path of the north magnetic pole in stereographic projection. Solid blue shows the pole's evolution according to the COV-OBS.x1 (1840–1999) and CHAOS-6-x8 (1999–2019) geomagnetic field models, with green circles indicating recent decadal positions; red circles mark in situ measurements (1831–2007)⁴¹⁹. The international date line is shown by the dotted black line on the 180° meridian. Predictions (Methods) 2019–2029 are linear extrapolations from the World Magnetic Model Version 2 (ref. ⁹) in black, linear extrapolation from CHAOS-6-x8 in magenta, a purely diffusive model based on fitting geomagnetic secular variation over 2014–2019 in orange²¹ and frozen-flux evolution using an ensemble of large-scale flows^{2Q21} in white.

NATURE GEOSCIENCE | VOL 13 | MAY 2020 | 387–391 | www.nature.com/naturegeoscience
Livermore et al., 2020

Linha azul – dois modelos de campo (1840-1999, 1999-2019)

Pontos verdes – posição preditas nas últimas décadas

Pontos vermelhos – medidas in-situ (1831-2007)

Deriva do polo – velocidade para o Norte

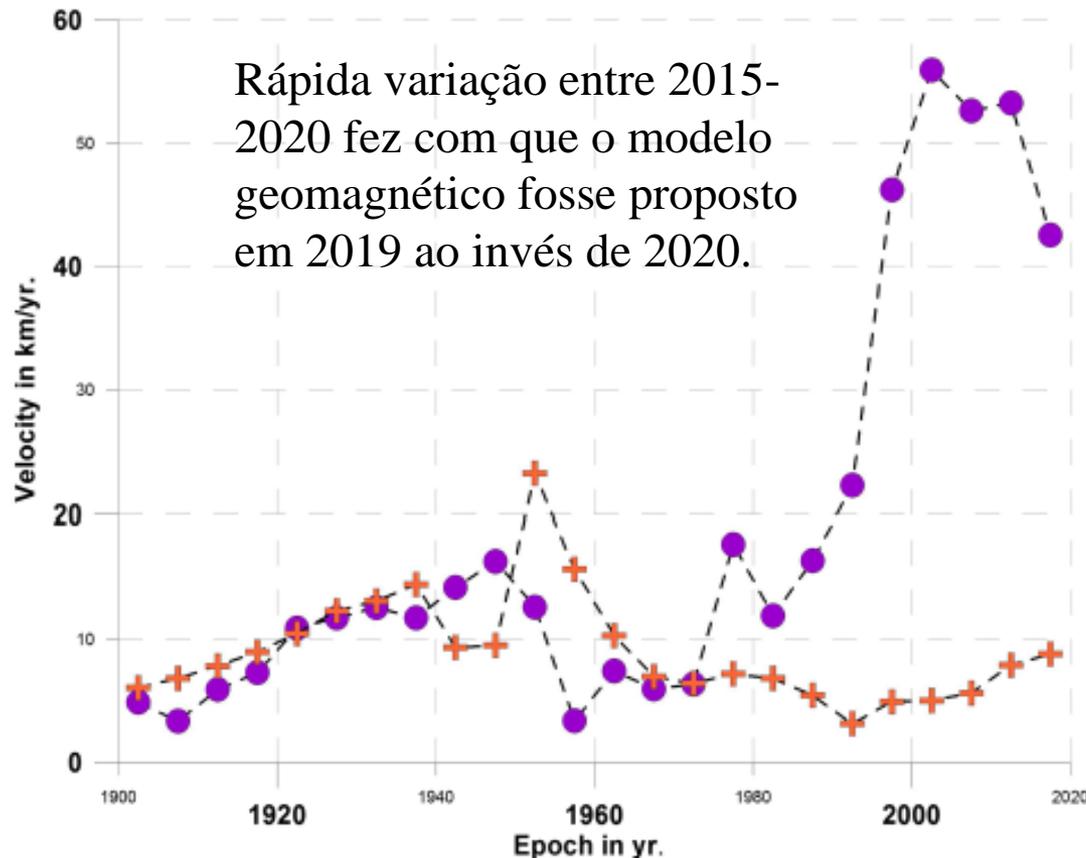
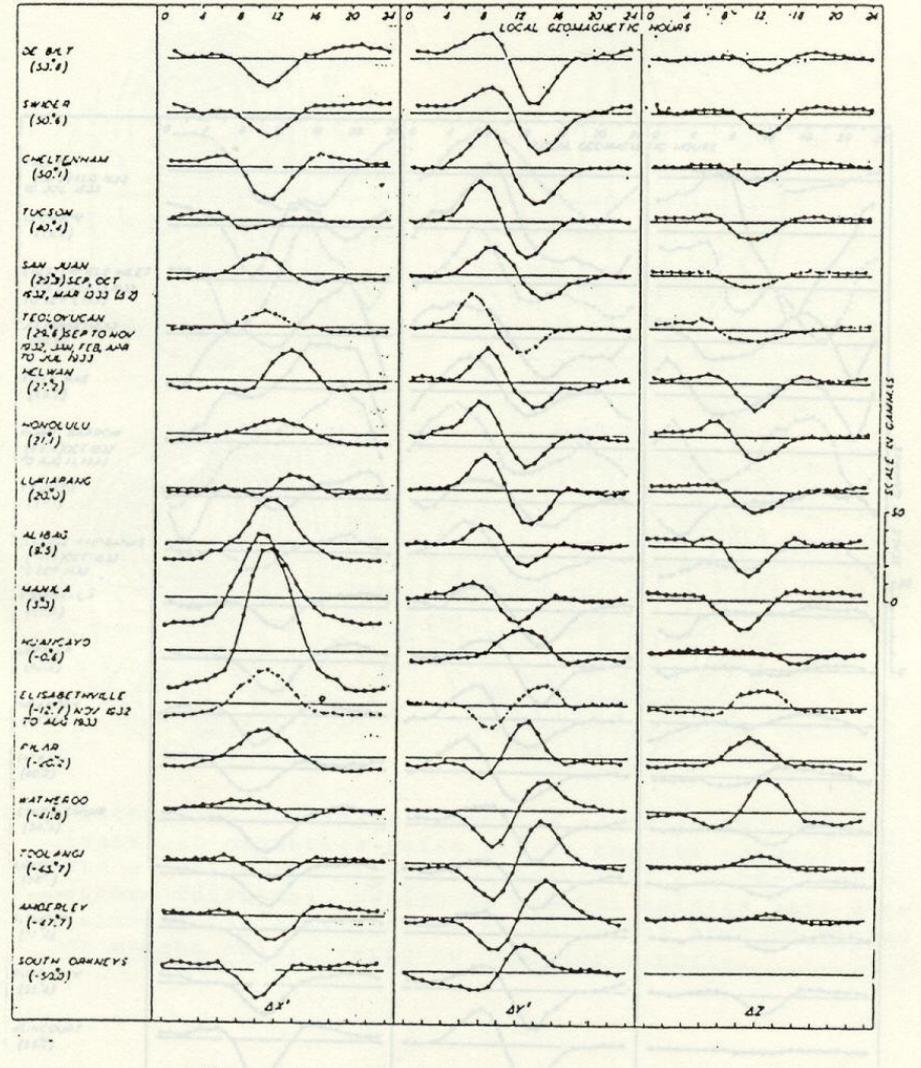


Figure 4 The northward velocity of the geomagnetic dip poles in the northern (purple dots) and southern (orange crosses) hemisphere as estimated by IGRF-12 on the WGS84 spheroid.

Variações diurnas

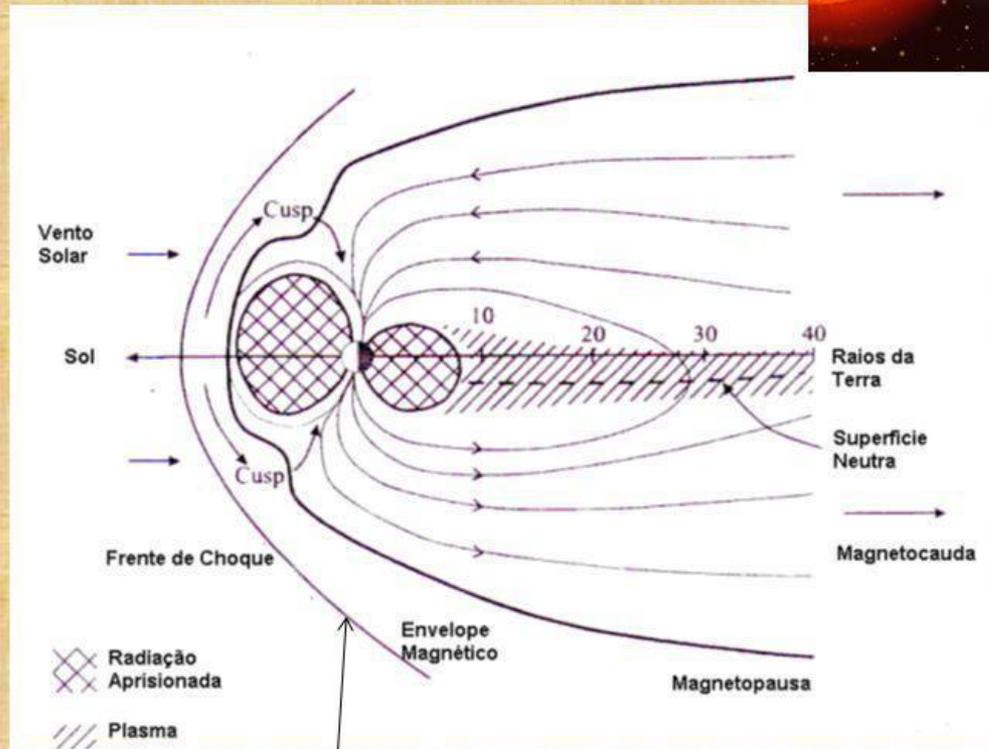
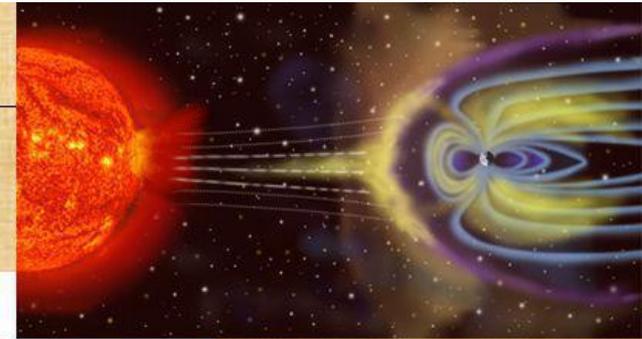
Variações Diurnas são variações de período igual a 24 horas (correlacionadas com o movimento de rotação da Terra), que dependem do local de medição (posição geográfica) e são regularmente registradas por observatórios fixos. Tais variações possuem amplitude mais intensa no verão. Os registros desse tipo de variação apresentam-se sobre duas formas distintas, dadas por **dia calmo** e por **dia perturbado**. A variação de dia calmo é suave, regular e de baixa amplitude, enquanto que a variação de dia perturbado é bem menos regular e está associada a tempestades magnéticas.



Variações do campo magnético – curto período – variação diurna

- origem externa na interação do vento solar com o campo magnético externo.

Magnetosfera



$$V_{\text{vento solar}} = V_{\text{som}}$$

Espaço interstelar:
CM = 1 nT

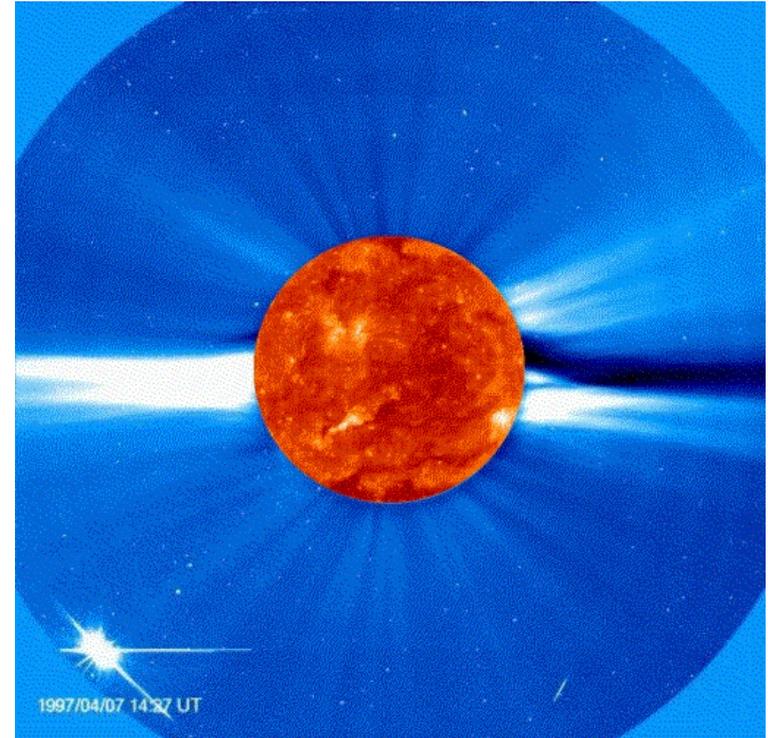
Vento solar = 5 nT
(para $d_{\text{Terra-Sol}}$)

$V_{\text{Vento solar}} = 270-650 \text{ km/s}$

$10 \times > V_{\text{alfvén}}$

O VENTO SOLAR

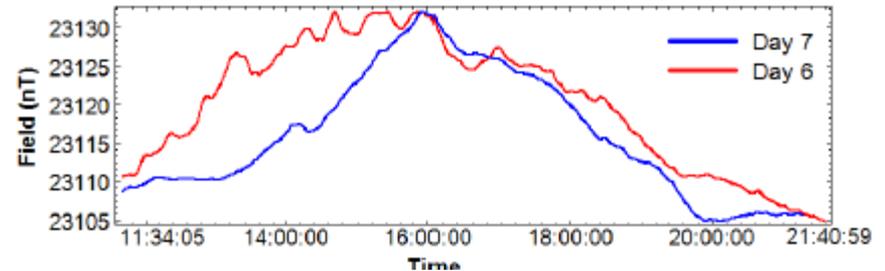
- O vento solar emana do Sol em todas as direções a velocidades de 400 a 500 km/s ($\sim 1.000.000$ km/h), proveniente da coroa. Nesta região, a temperatura é tão elevada, que a força da gravidade não é suficiente para "segurar" as partículas.
- Pouco se sabe dos motivos pelos quais os gases da coroa adquirem velocidades e temperatura tão elevadas, e este ainda é um desafio no estudo do Sol.
- Normalmente as temperaturas decaem à medida que nos afastamos da fonte de calor, mas nesta região ocorre o inverso, e não se conseguiu ainda consenso sobre a causa deste fenômeno.
- O Advanced Composition Explorer (ACE), lançado em 1998, situado no ponto L1 (1,5 milhões de km da Terra, em direção ao Sol), carrega diversos instrumentos que fornecem informações diversas sobre o vento solar em tempo real.



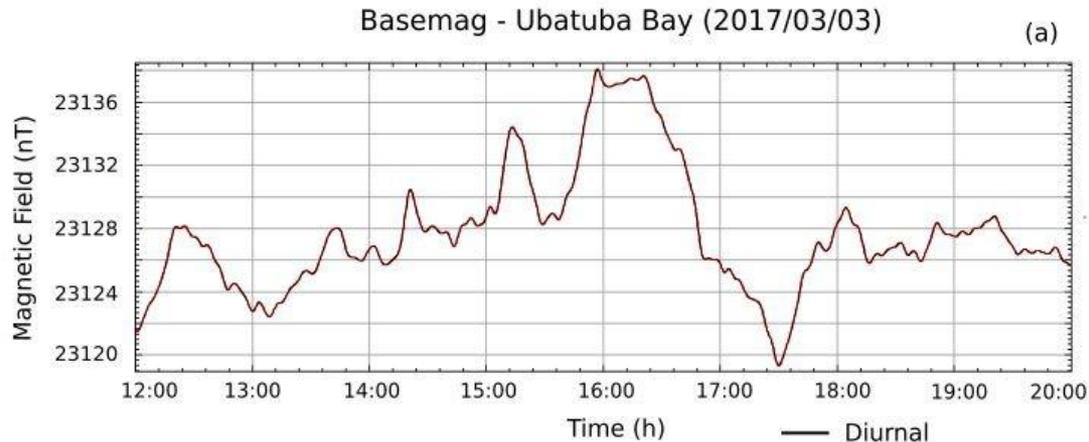
"NUVEM MAGNÉTICA"
ACOMPANHANDO O VENTO SOLAR
DURANTE UMA EJEÇÃO DE MASSA
CORONAL

Variações do campo magnético – curto período

- Resolve-se com magnetômetro base, estacionado em um mesmo ponto durante todo o levantamento.
- A estação base deve ficar de preferência em um região de gradientes magnéticos suaves.
- Os valores de variação diurna são removidos das medidas.



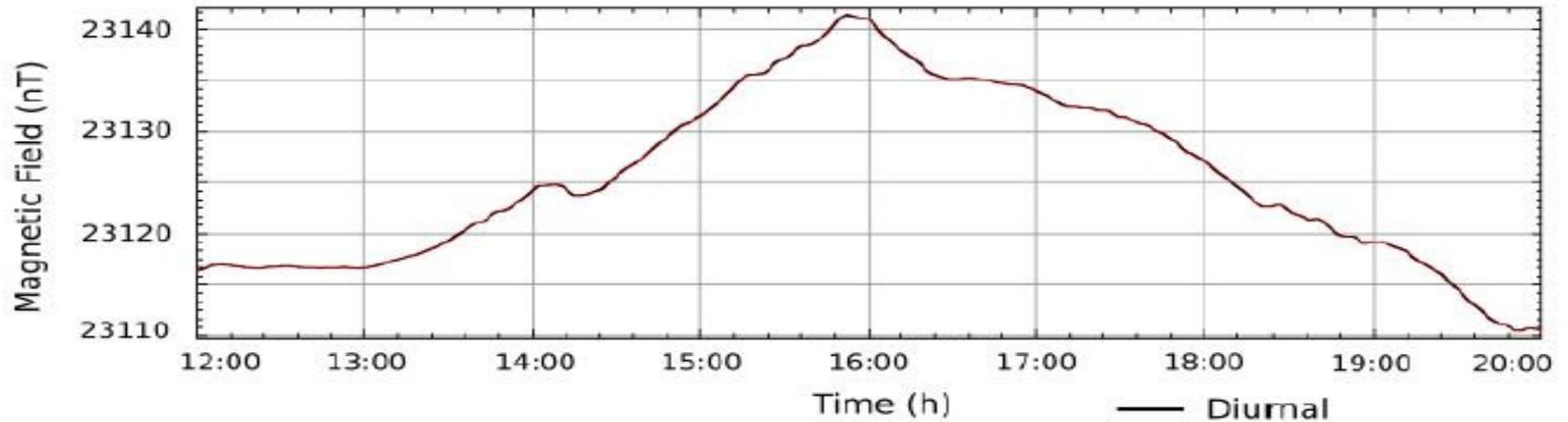
Medidas do CMT no magnetômetro base em Paraty (RJ), nos dias 6 e 7 de outubro de 2017.



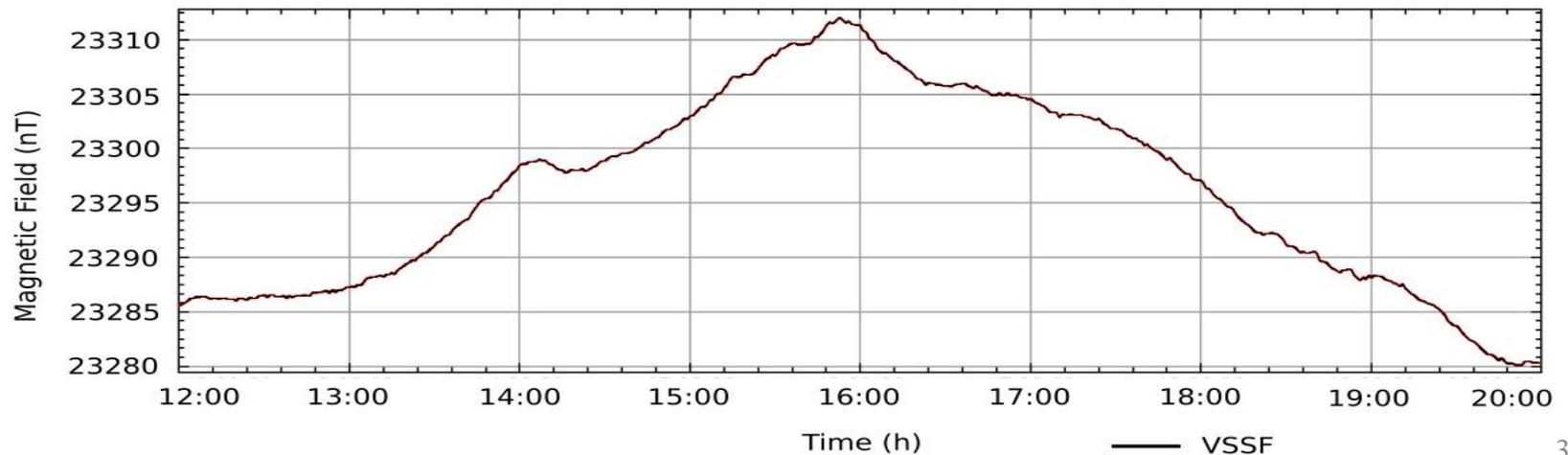
Variações do campo magnético – curto período – exemplo de variação diurna

Basemag - Mamanguá Bay (2017/10/07)

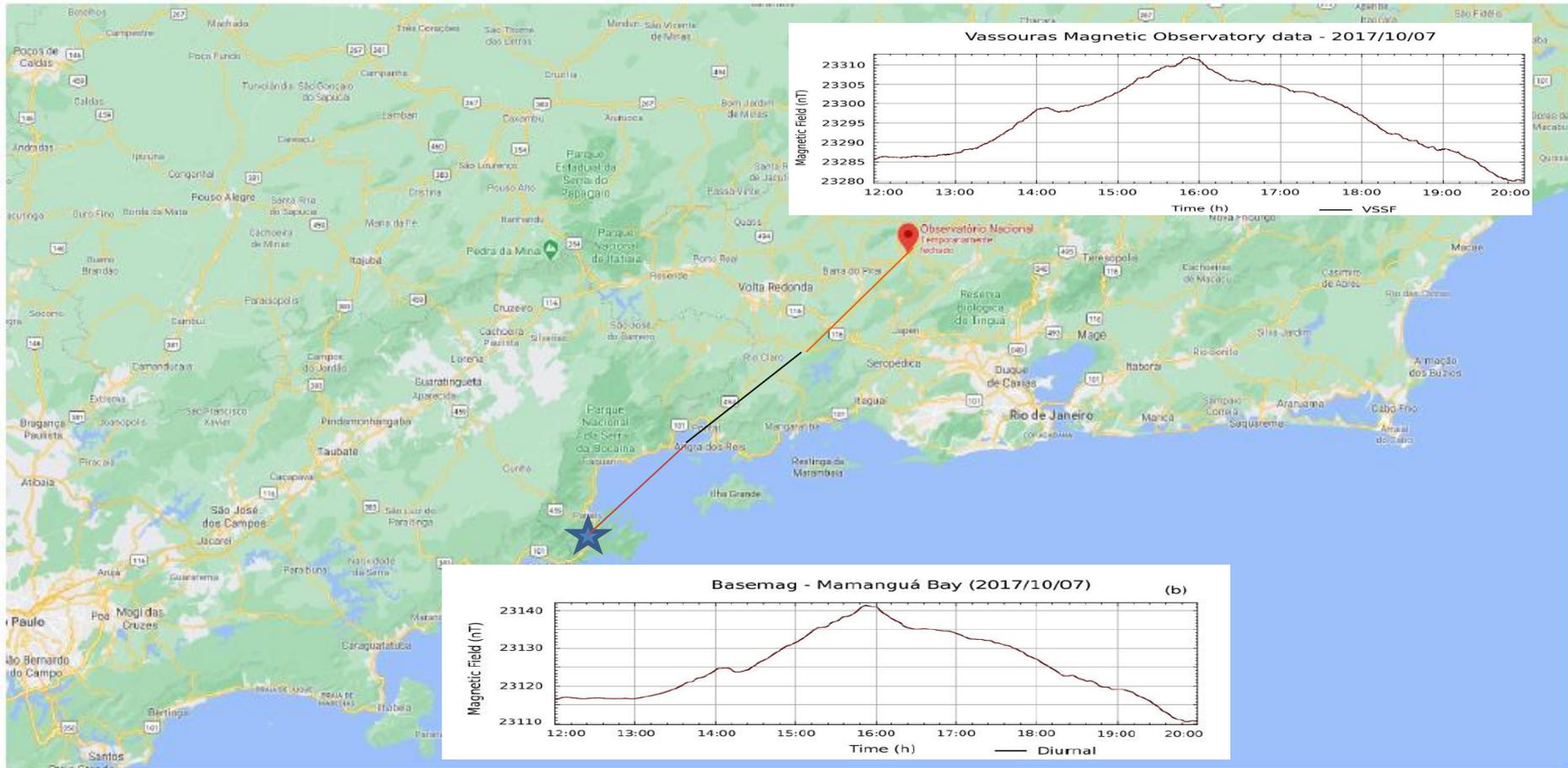
(b)



Vassouras Magnetic Observatory data - 2017/10/07



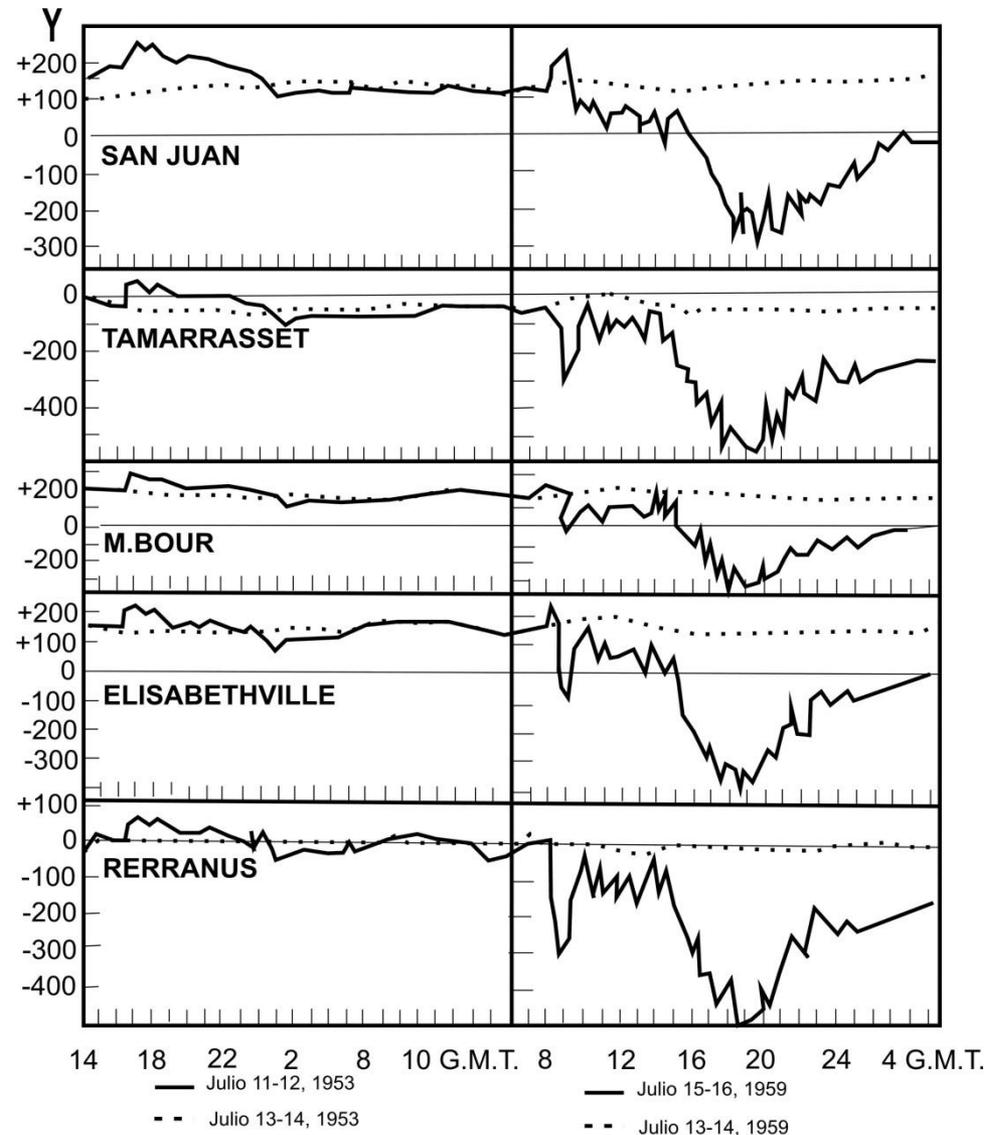
Vassouras (gota vermelha) e Mamangá (estrela azul) - Cerca de 60 km de distância



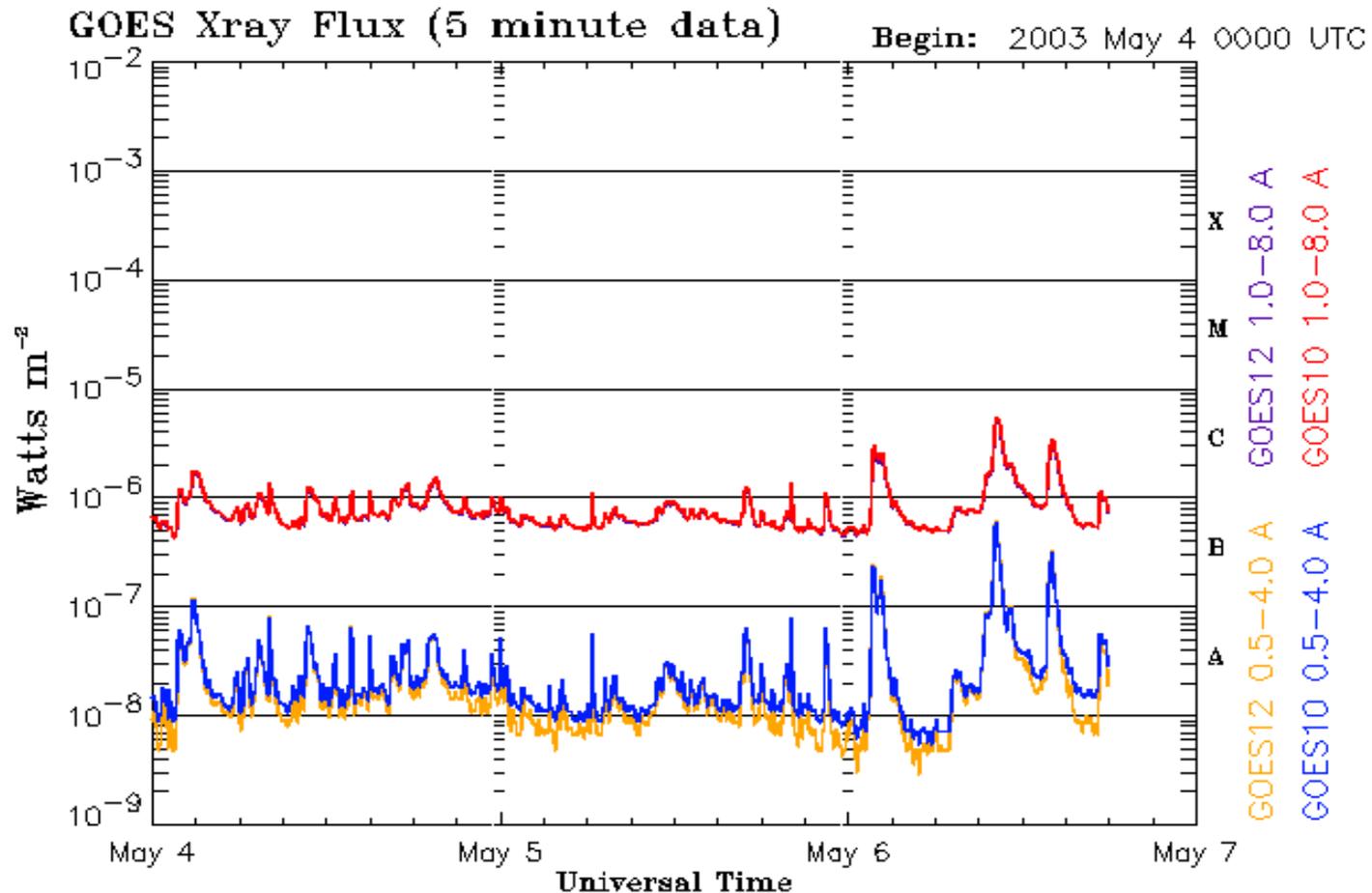
Dados do mapa ©2020 Google 20 km

Tempestades magnéticas

Tempestades Magnéticas: são variações súbitas e imprevisíveis, em geral, que afetam severamente o trabalho de prospecção magnética, obrigando mesmo à sua paralisação. Registram-se amplitudes da ordem de 1% do campo magnético em latitudes elevadas (acima de + 60° e abaixo de -60°); nos polos, por ocasião das auroras, essas amplitudes são ainda maiores.



Tempestades magnéticas



Updated 2003 May 6 18:06:05 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

Uma tempestade magnética foi originada pelo fluxo anormal de partículas provenientes do Sol no início de maio/2003.

Tempestades magnéticas

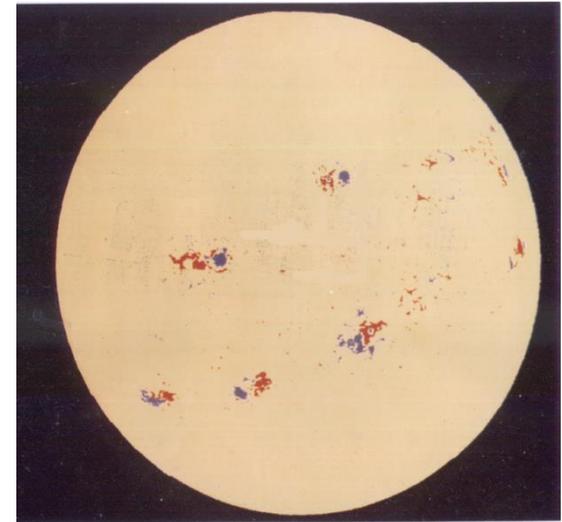
NOAA Space Weather Scale for Geomagnetic Storms

Category		Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
Scale	Descriptor	Duration of event will influence severity of effects		
Geomagnetic Storms			Kp values*	Number of storm events when Kp level was met; (number of storm days)
G 5	Extreme	<p>Power systems: : widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage.</p> <p>Spacecraft operations: may experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites.</p> <p>Other systems: pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours, and aurora has been seen as low as Florida and southern Texas (typically 40° geomagnetic lat.)**.</p>	Kp = 9	4 per cycle (4 days per cycle)
G 4	Severe	<p>Power systems: possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid.</p> <p>Spacecraft operations: may experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems.</p> <p>Other systems: induced pipeline currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted, and aurora has been seen as low as Alabama and northern California (typically 45° geomagnetic lat.)**.</p>	Kp = 8, including a 9-	100 per cycle (60 days per cycle)
G 3	Strong	<p>Power systems: voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices.</p> <p>Spacecraft operations: surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems.</p> <p>Other systems: intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent, and aurora has been seen as low as Illinois and Oregon (typically 50° geomagnetic lat.)**.</p>	Kp = 7	200 per cycle (130 days per cycle)
G 2	Moderate	<p>Power systems: high-latitude power systems may experience voltage alarms, long-duration storms may cause transformer damage.</p> <p>Spacecraft operations: corrective actions to orientation may be required by ground control; possible changes in drag affect orbit predictions.</p> <p>Other systems: HF radio propagation can fade at higher latitudes, and aurora has been seen as low as New York and Idaho (typically 55° geomagnetic lat.)**.</p>	Kp = 6	600 per cycle (360 days per cycle)
G 1	Minor	<p>Power systems: weak power grid fluctuations can occur.</p> <p>Spacecraft operations: minor impact on satellite operations possible.</p> <p>Other systems: migratory animals are affected at this and higher levels; aurora is commonly visible at high latitudes (northern Michigan and Maine)**.</p>	Kp = 5	1700 per cycle (900 days per cycle)

Classificação do NOAA para tempestades magnéticas

TEMPESTADES MAGNÉTICAS DE AGOSTO/1972

- Forte atividade solar entre 2 e 11/ago/1972; 67 flares, dos quais 4 de classe X (estimativa de uma X20).
- Mais de 16h de atividade anormal em raios-X; rara emissão de raios gama detectadas por satélite.
- Magnetômetros em Boulder e Honolulu saturaram; $K_p=9$ por diversas horas.
 - Detonação espontânea de dezenas de minas submarinas do tipo Destructor magnetic-influence sea mines. Estima-se que aproximadamente 4.000 minas foram detonadas.
- Estima-se que, caso a configuração geomagnética fosse outra, o evento poderia ser comparável ao Evento Carrington.

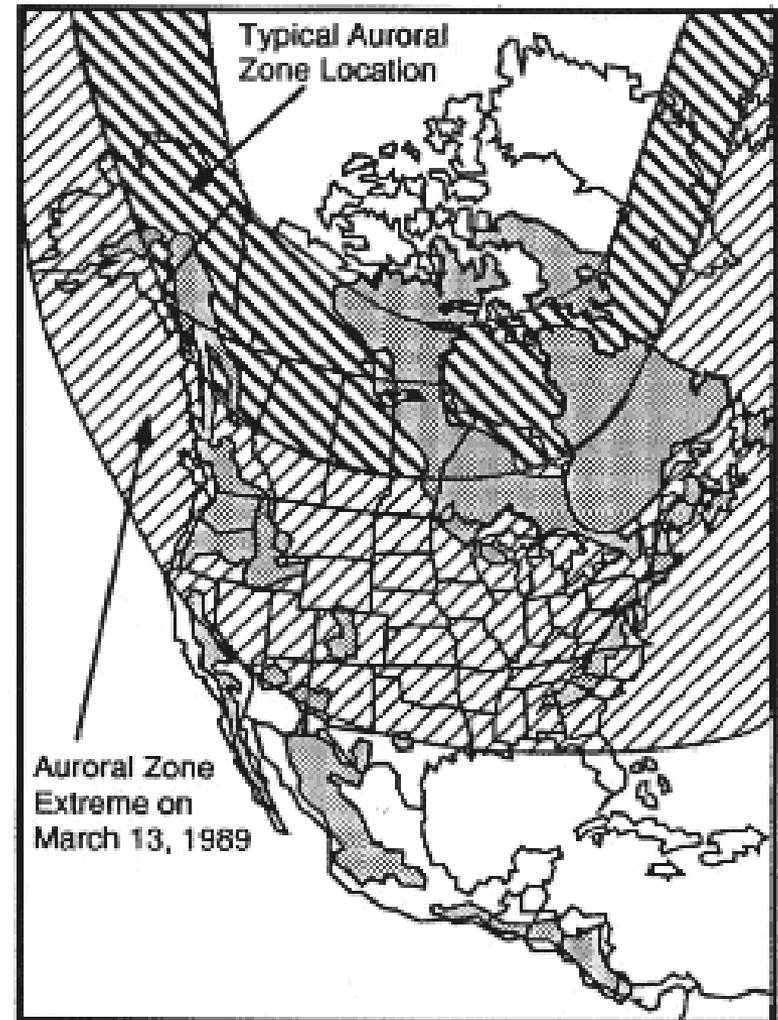


13/MAR/1989 – UM APAGÃO NA REDE ELÉTRICA CANADENSE FOI CAUSADO POR UMA TEMPESTADE MAGNÉTICA, ORIGINADA POR UM *FLARE* SOLAR OCORRIDO 3 DIAS ANTES

- Em 10/mar/1989 ocorreu uma explosão solar, e uma nuvem com bilhões de toneladas de gás foi ejetada em poucos segundos, com uma energia equivalente a milhares de bombas nucleares explodindo ao mesmo tempo.

- Na tarde de 12/mar/1989 a nuvem chegou à Terra, causando auroras até em latitudes baixas como na Flórida e em Cuba, e correntes elétricas foram geradas até no nível do solo.

- As correntes geradas acarretaram falhas no sistema elétrico de Quebec, que em menos de 2 minutos colapsou inteiramente.



- Durante as 12 horas seguintes, 6 milhões de pessoas ficaram sem energia elétrica, padecendo do frio e dos efeitos colaterais desta falta de energia.

- Metrô, aeroportos e abastecimento em geral ficaram seriamente comprometidos neste período.

- A rede elétrica norteamericana também foi severamente atingida, com mais de 200 problemas em estações de energia elétrica, mas sem apagão.

- Alguns satélites ficaram fora de controle por várias horas; um dos sensores de pressão do ônibus espacial Discovery começou a indicar uma pressão muito acima da normal no período, e só se normalizou no dia seguinte.

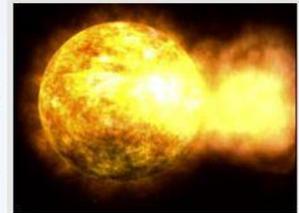
- Centenas de milhões de dólares foram gastos para executar os reparos na rede e no ressarcimento de danos.



Artist rendition of the 1989 blackout. Credit: NASA

On March 13, 1989 the entire province of Quebec, Canada suffered an electrical power blackout. Hundreds of blackouts occur in some part of North America every year. The Quebec Blackout was different, because this one was caused by a solar storm!

On Friday March 10, 1989 astronomers witnessed a powerful explosion on the sun. Within minutes, tangled magnetic forces on the sun had released a billion-ton cloud of gas. It was like the energy of thousands of nuclear bombs exploding at the same time. The storm cloud rushed out from the sun, straight towards Earth, at a million miles an hour. The solar flare that accompanied the outburst immediately caused short-wave radio interference, including the jamming of radio signals from Radio Free Europe into Russia. It was thought that the signals had been jammed by the Kremlin, but it was only the sun acting up!

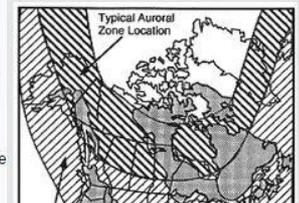


[> Click to view animation](#)

On the evening of Monday, March 12 the vast cloud of solar plasma (a gas of electrically charged particles) finally struck Earth's magnetic field. The violence of this 'geomagnetic storm' caused spectacular 'northern lights' that could be seen as far south as Florida and Cuba. The magnetic disturbance was incredibly intense. It actually created electrical currents in the ground beneath much of North America. Just after 2:44 a.m. on March 13, the currents found a weakness in the electrical power grid of Quebec. In less than 2 minutes, the entire Quebec power grid lost power. During the 12-hour blackout that followed, millions of people suddenly found themselves in dark office buildings and underground pedestrian tunnels, and in stalled elevators. Most people woke up to cold homes for breakfast. The blackout also closed schools and businesses, kept the Montreal Metro shut during the morning rush hour, and closed Dorval Airport.

Solar flares and coronal mass ejections (CMEs), associated giant clouds of plasma in space, are the largest explosions in the solar system. They are caused by the buildup and sudden release of magnetic stress in the solar atmosphere above the giant magnetic poles we see as sunspots. CMEs can cause magnetic storms affecting communication systems, power grids and astronauts in space. Click on image to view movie. Credit: NASA/ Walt Feimer

The Quebec Blackout was by no means a local event. Some of the U.S. electrical utilities had their own cliffhanger problems to deal with. New York Power lost 150 megawatts the moment the Quebec power grid went down. The New England Power Pool lost 1,410 megawatts at about the same time. Service to 96 electrical utilities in New England was interrupted while other reserves of electrical power were brought online. Luckily, the U.S. had the power to spare at the time...but just barely. Across the United States from coast to coast, over 200 power grid problems erupted within



Variações do campo magnético - reversões

- polaridades opostas interpretadas como reversão do campo.
- Duas propostas alternativas para as reversões:
 - 1 - o eixo do dipolo gira de 180° sem variação do momento magnético
 - 2 - o momento do dipolo decai a cerca de 10% de seu valor normal e a energia é transferida ao campo não dipolar
- Observações através do paleomagnetismo não distinguem entre as hipóteses. O período de transição varia entre 3500 a 5000 anos. Há indicação de que a intensidade do campo diminui muito.
- A duração dos intervalos de polaridade é muito variável.
- A frequência com que eles ocorrem também é muito variável.

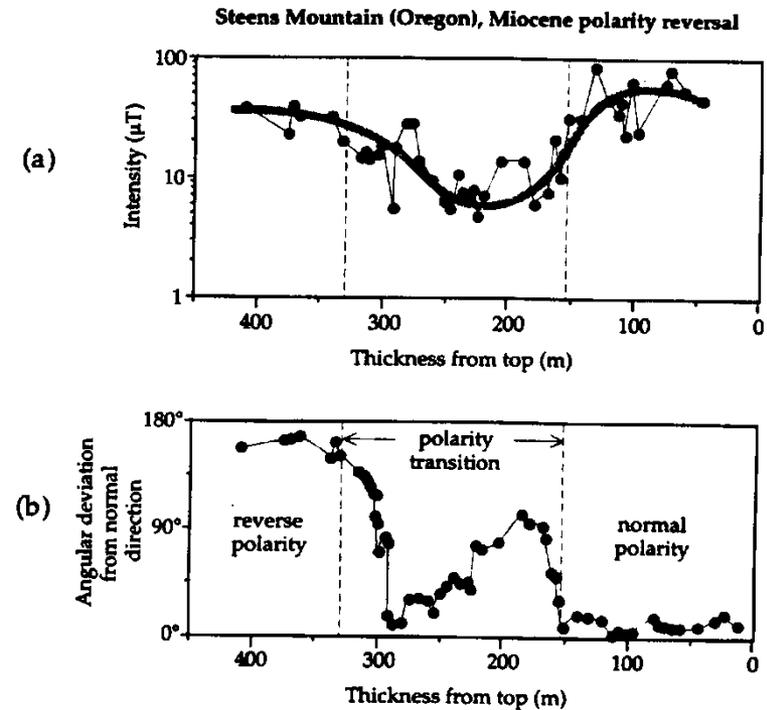
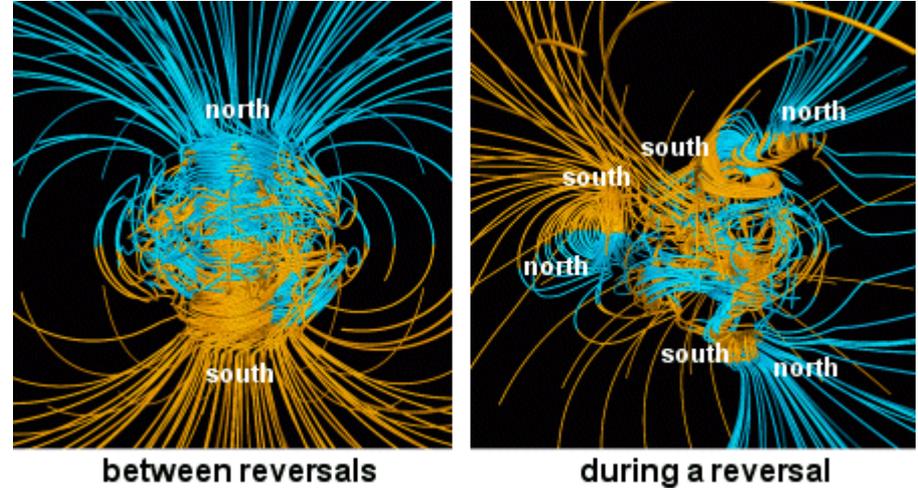
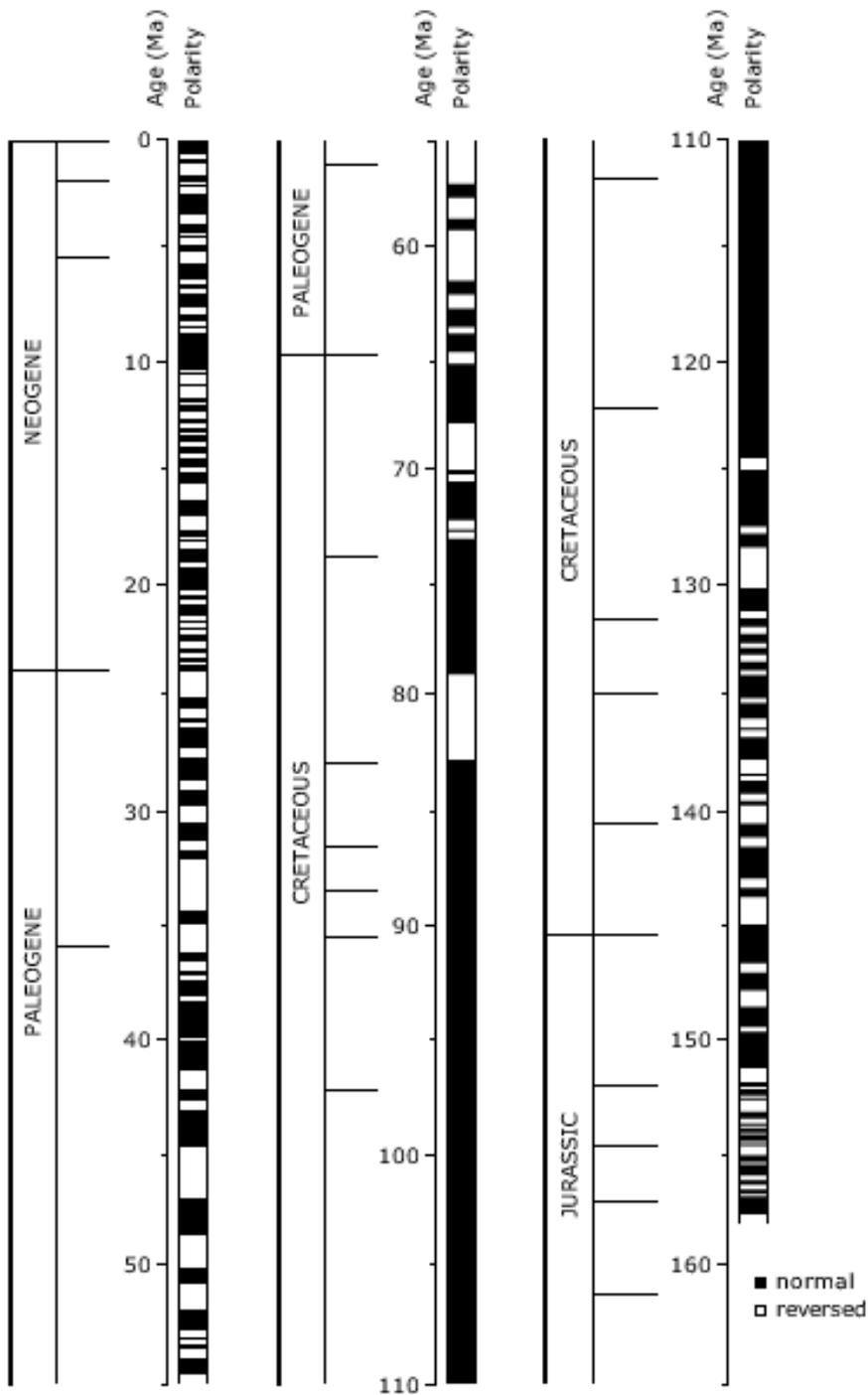


Fig. 5.71 The record of a reversed-to-normal Miocene polarity transition at Steens Mountain, Oregon. (a) The paleointensity record during the transition and (b) the directional record, shown as the angular deviation from the normal paleomagnetic direction outside the transition (after Prévot *et al.*, 1985). *Downie (1997)*

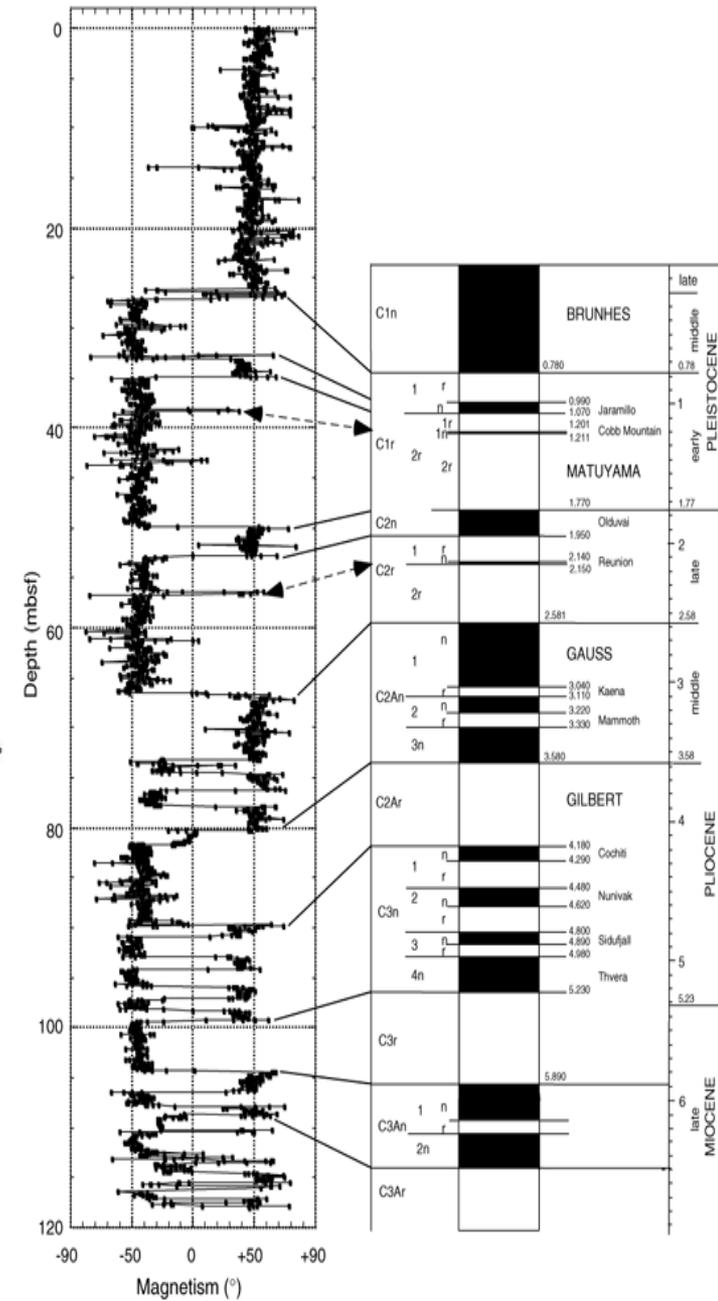
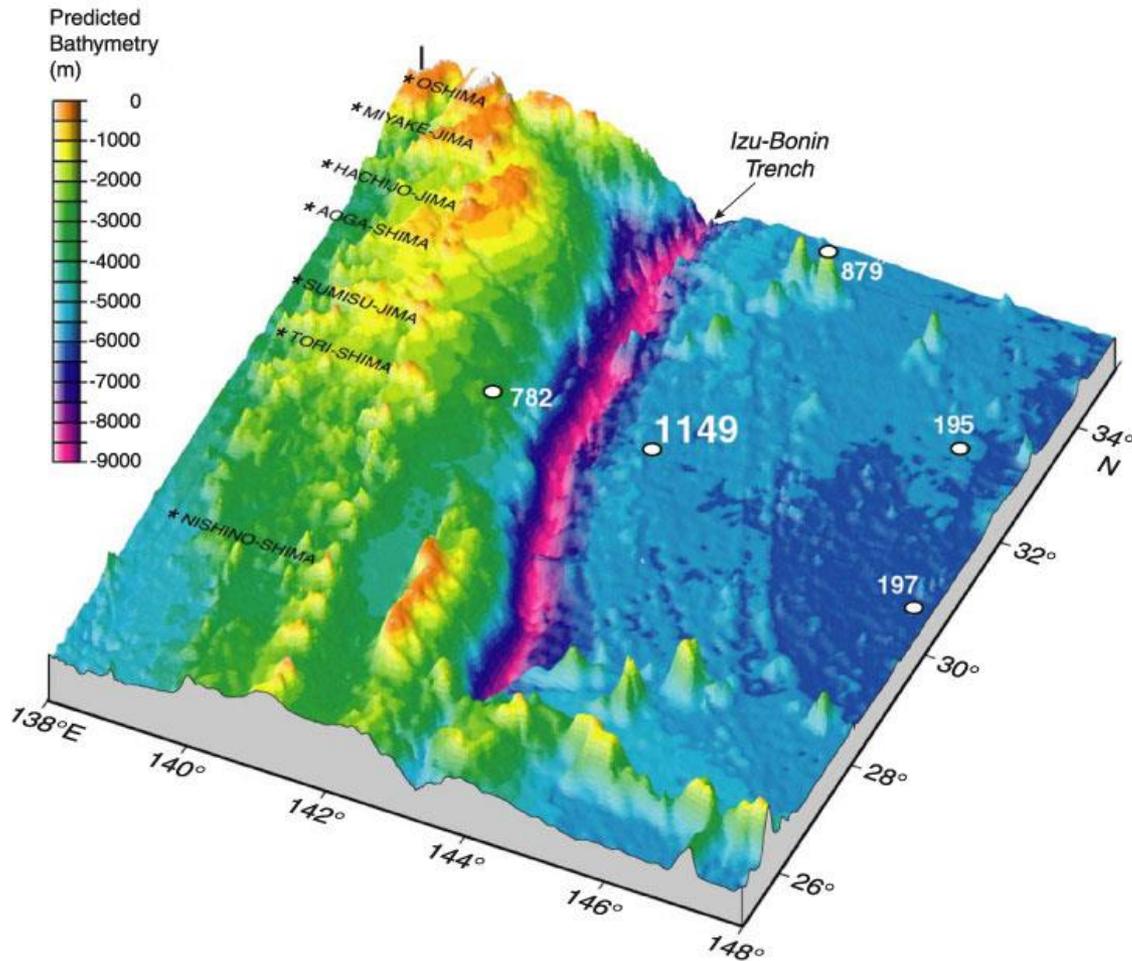
Reversão do CMT



Carta de
reversões do
CMT

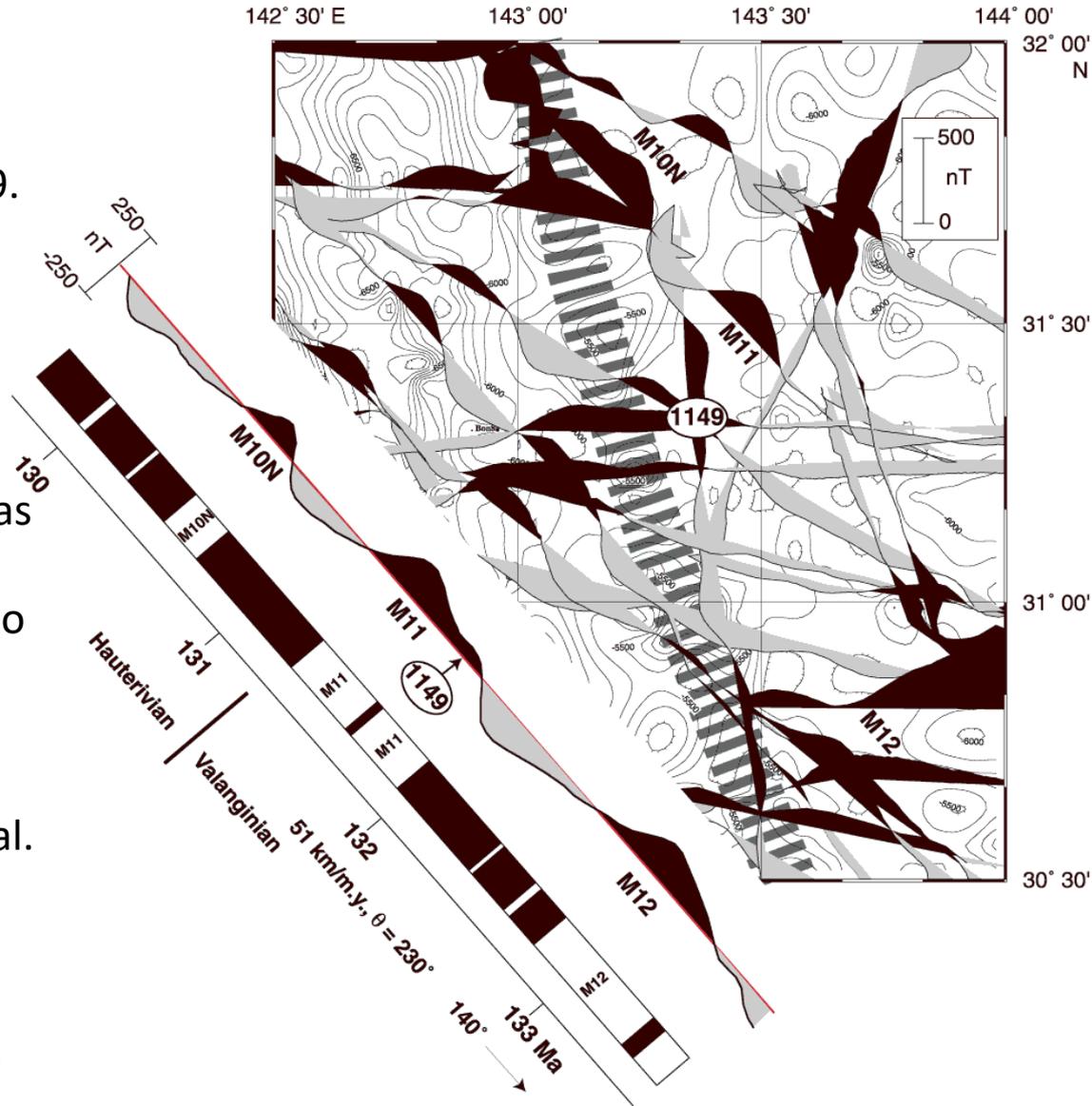
Reversão do CMT

Magnetic reversal stratigraphy in the upper 120 m at Site 1149 Leg 185



Reversão do CMT

Anomalias magnéticas e batimetria predita nas vizinhanças do sitio 1149. Intervalo de contorno de 100m. As anomalias magnéticas foram representadas ao longo do perfis do navio com anomalias positivas em preto e negativas em cinza. Perfil da anomalia magnética calculado para as anomalias observadas M10N, M11 e M12. Blocos pretos são magnetização normal e branco são os de magnetização reversa. As escalas de tempo da magnetização e bioestratigráfica são de Channell et al. (1995). Parâmetros do modelo: taxa de espalhamento = 51 km/m.y.; assimetria = 230°; e tendência do perfil na direção das anomalias mais antigas = 140°.



Reversão do CMT

- Observação de reversão do CMT em sequências de derrames de lava nos Alpes ajudou a reforçar a teoria de deriva continental.
- Criou a disciplina de Paleomagnetismo.