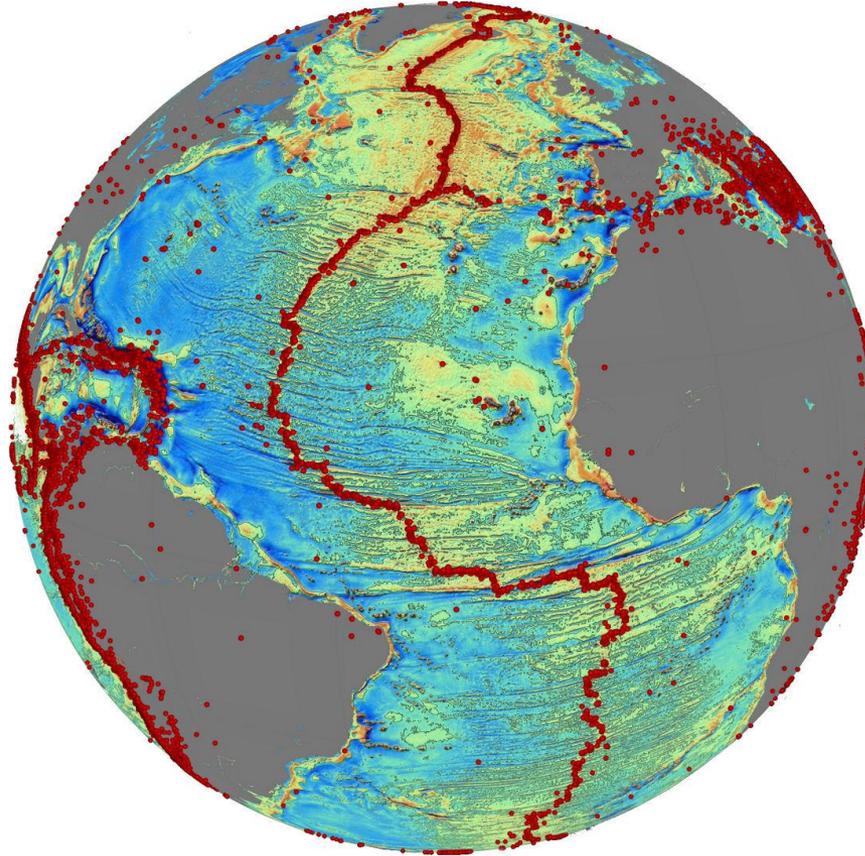


O campo de gravidade terrestre



Gravimetria

Eder Cassola Molina

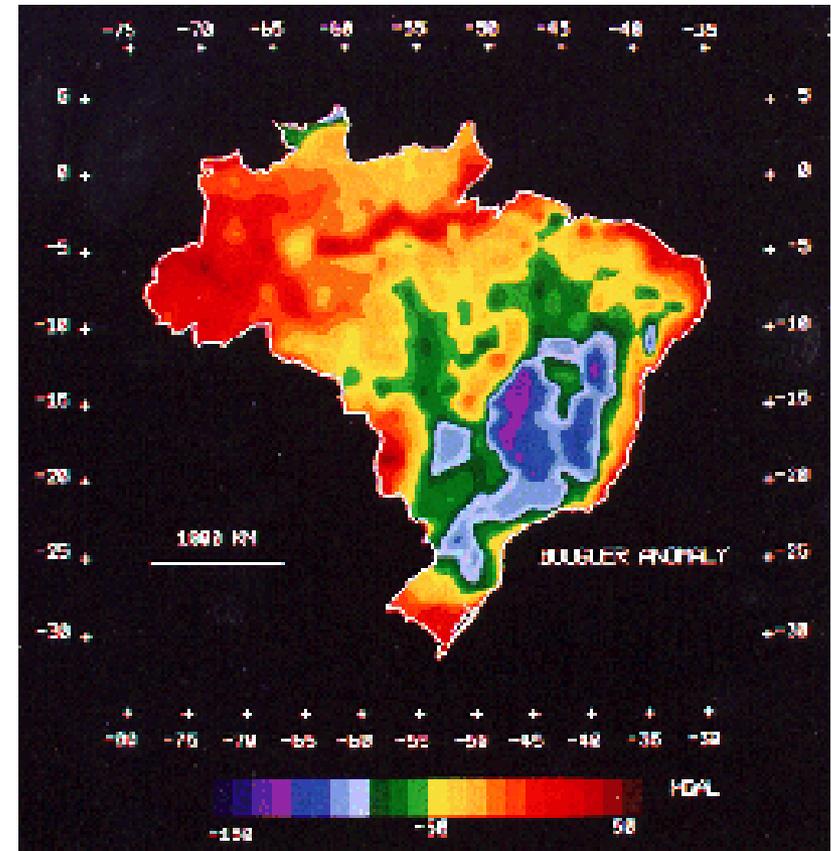
eder@iag.usp.br

O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE

Gravimetria

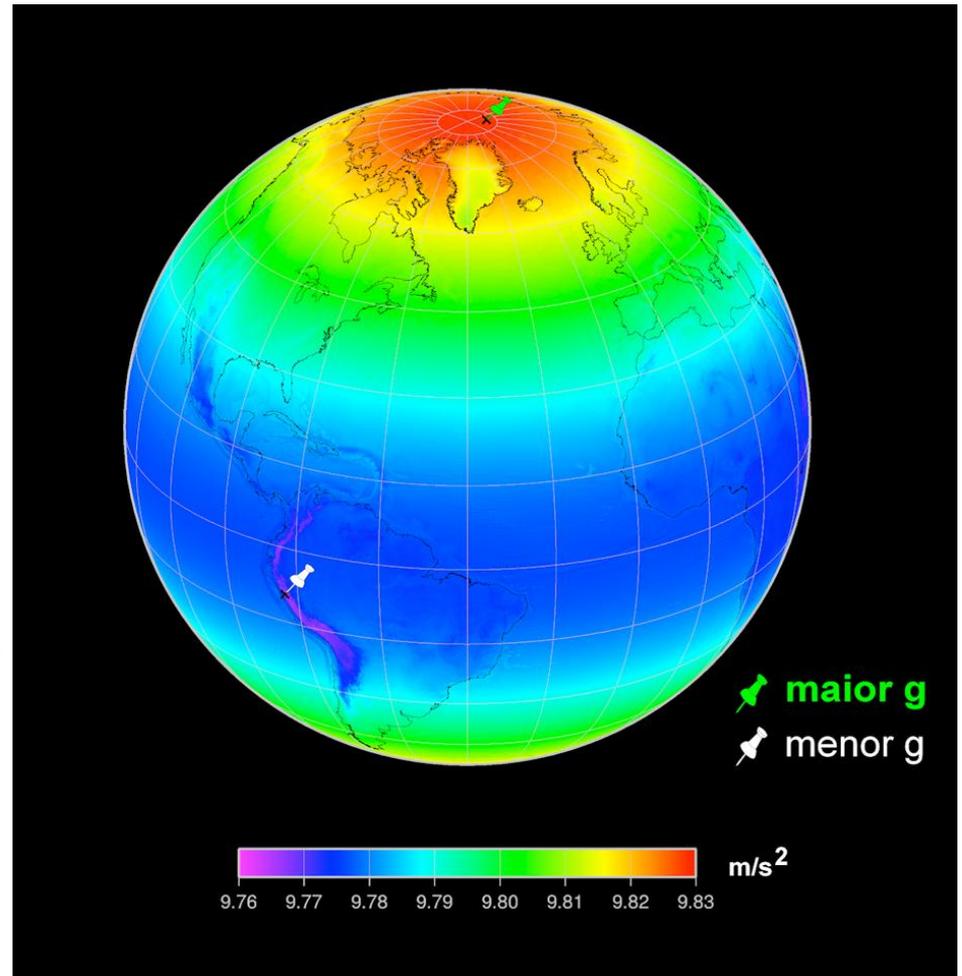
O campo de gravidade terrestre fornece importantes informações sobre a distribuição de massa do planeta.

Estruturas com diferentes densidades no interior terrestre causam modificação no campo de gravidade; estas variações são muito pequenas, mas possíveis de serem medidas por equipamentos muito sensíveis denominados gravímetros.



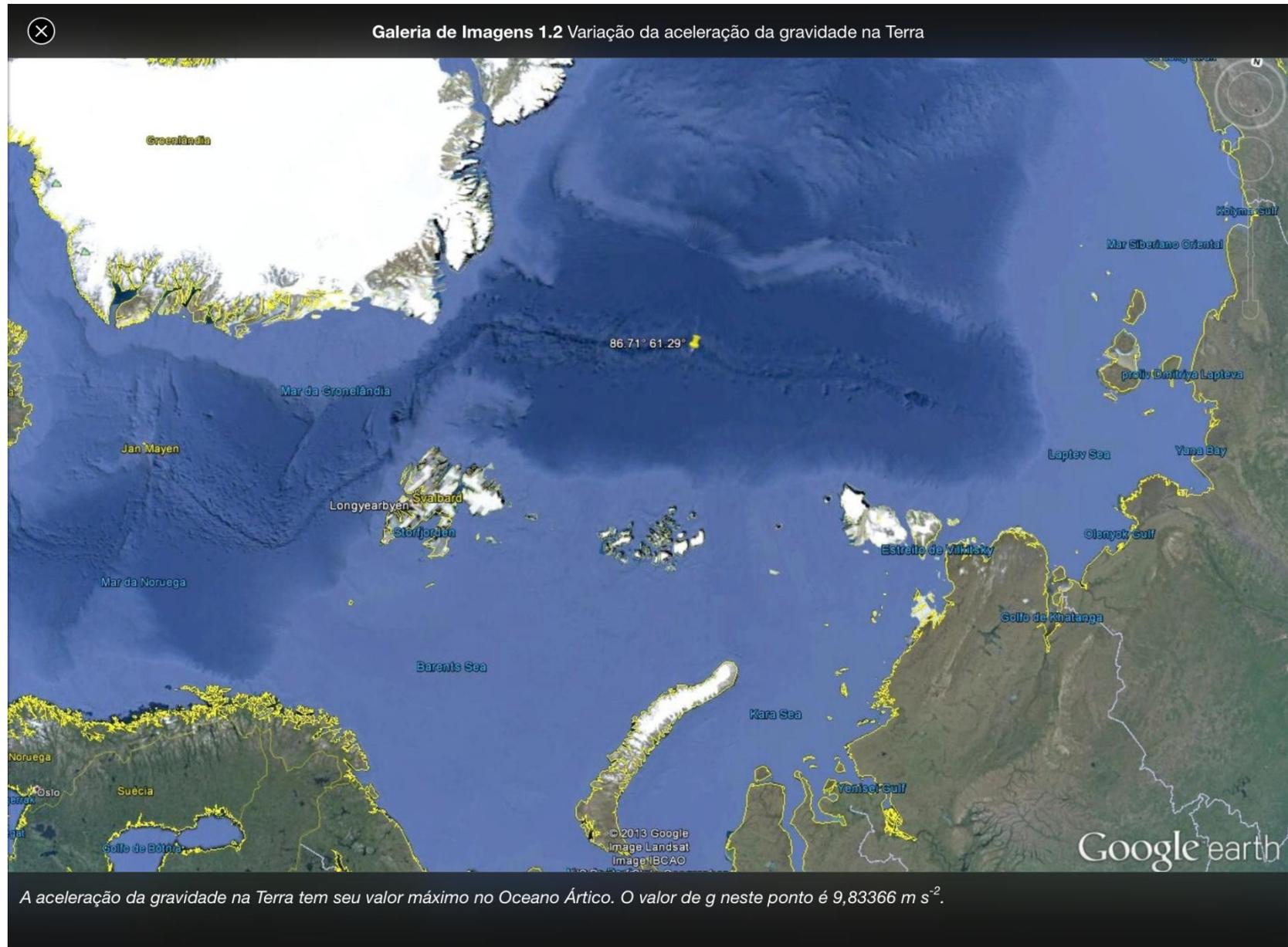
O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE

- Medição da aceleração da gravidade com gravímetros. Precisão melhor que 0,1 mGal
- (1 Gal = 1 cm/s²).
- [$g_{IAG} = 978.641,37$ mGal]
- Comparação com valores de aceleração associados a um modelo que melhor represente a Terra (elipsoide de revolução).
- A diferença entre o valor observado e o valor teórico é a **anomalia gravimétrica**.



Valor da aceleração da gravidade na superfície terrestre

O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE



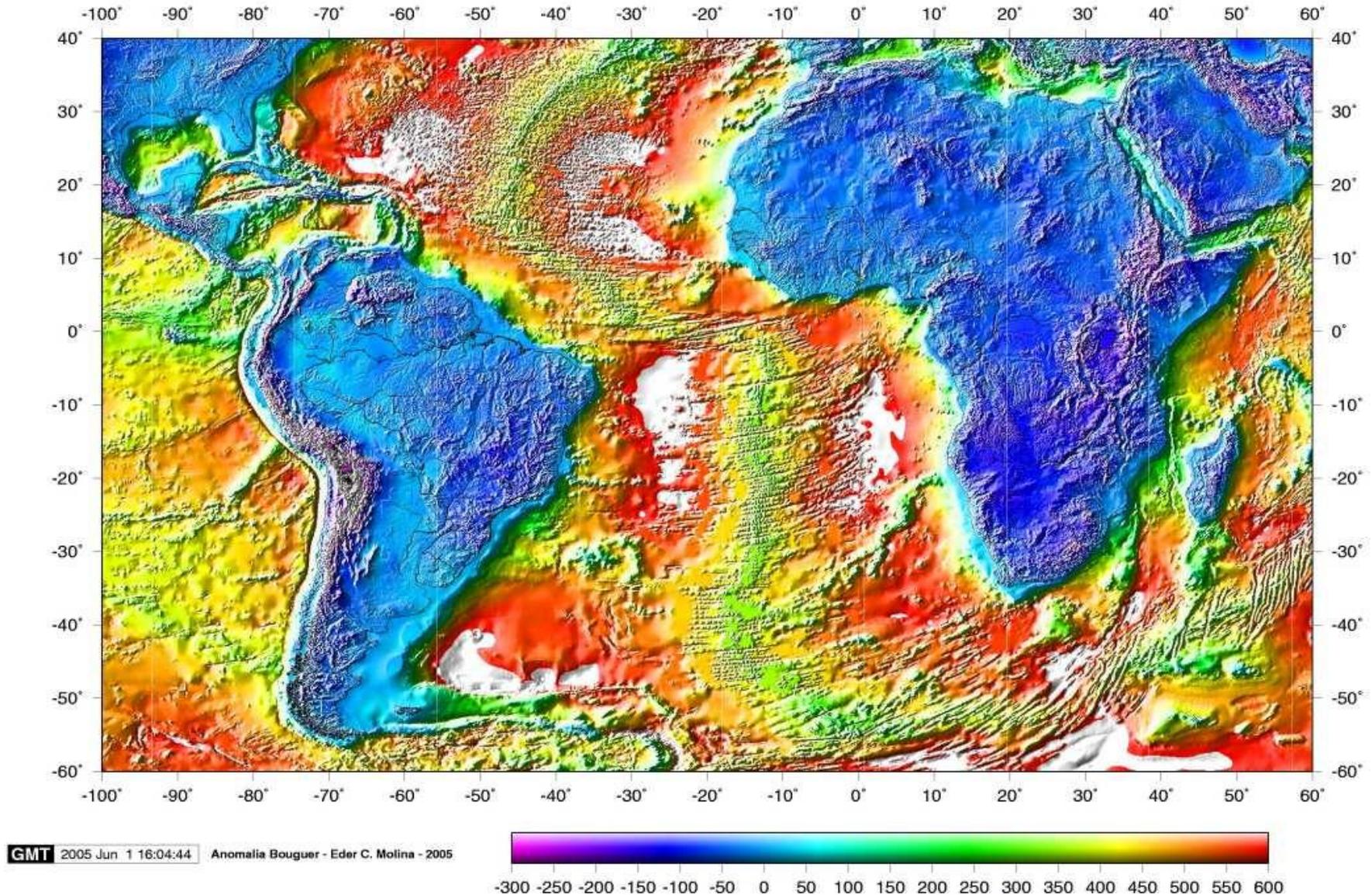
O maior valor da aceleração da gravidade na superfície terrestre fica no Oceano Ártico.

O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE



O menor valor da aceleração da gravidade na superfície terrestre fica no Peru.

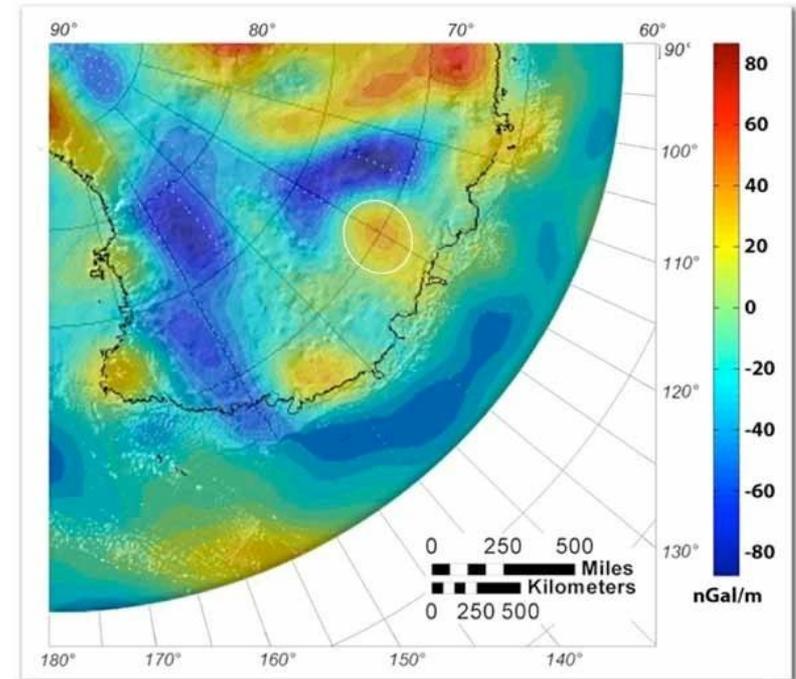
O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE



Mapa de anomalia Bouguer (mGal), mostrando os valores de aceleração da gravidade após a remoção de um valor de referência e as correções para remoção dos efeitos da altitude e da massa topográfica em relação ao nível médio do mar.

O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE

- Delimitação e modelagem de estruturas crustais (craton, crateras, bacias, faixas de dobramentos, falhas, etc.).
- Análise das anomalias: indicação da distribuição de massa em subsuperfície e dos processos genéticos que originam as estruturas observadas.

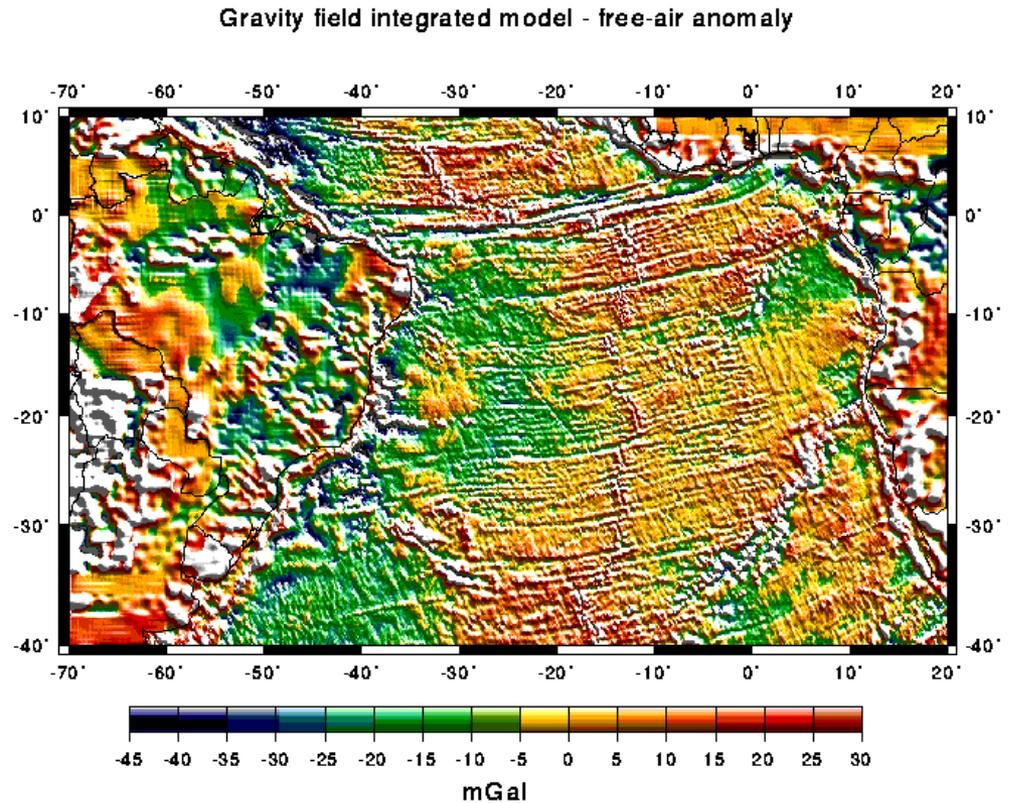


Variações da anomalia da gravidade, fornecidas pelos dados do GRACE. Regiões com concentração de massa estão em tons alaranjados e vermelhos. O círculo branco mostra a cratera Wilkes Land.

Imagem da Ohio State University

O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE

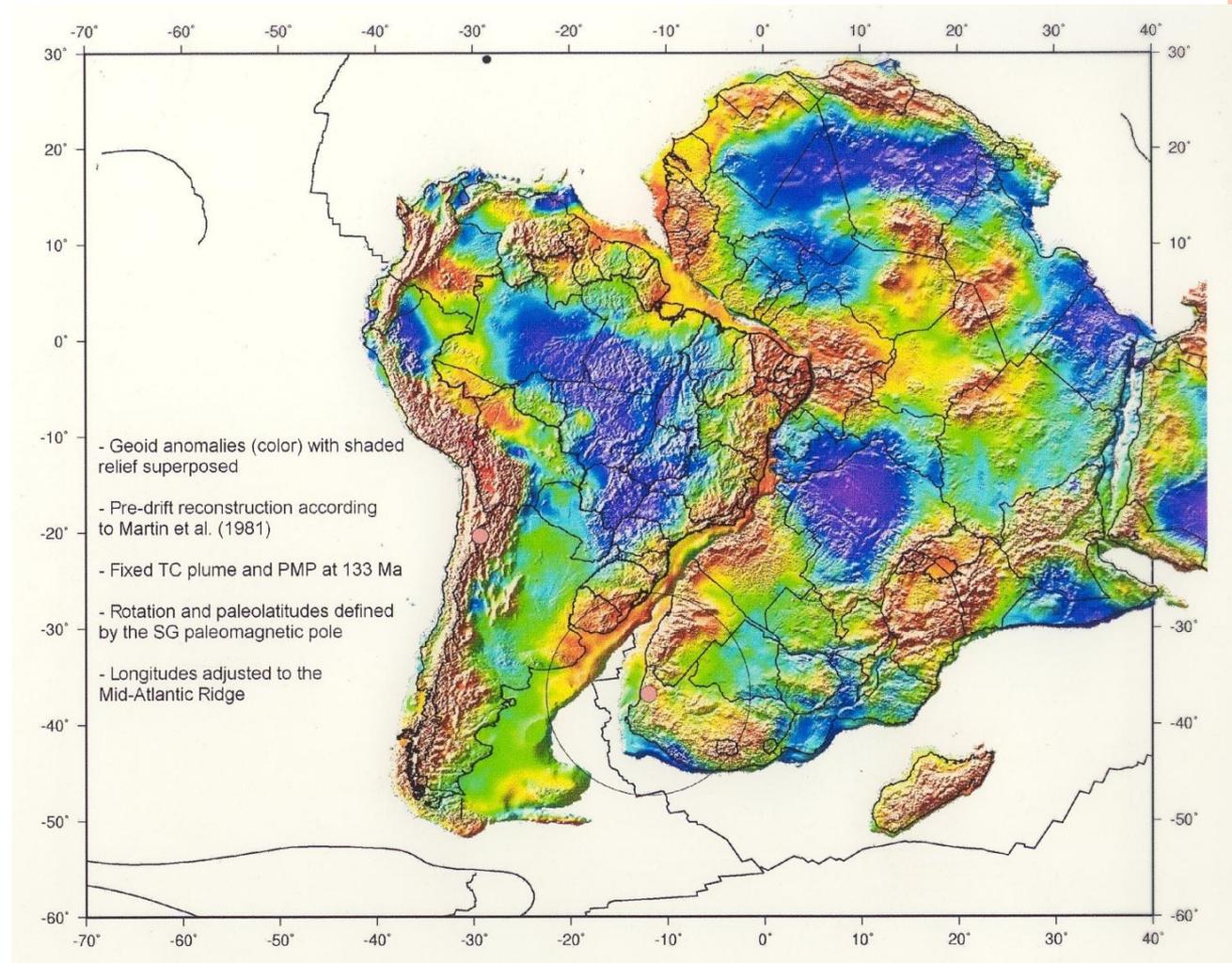
- Identificação e modelagem de zonas de fraturas oceânicas (uso extensivo de dados de altimetria por satélite e Geofísica marinha).



Mapa de anomalia da gravidade no Atlântico Sul, calculado a partir de medidas de aceleração da gravidade e altimetria por satélite (Molina, 1996).

O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE

A distribuição de anomalias de geóide, calculadas com auxílio dos dados gravimétricos, em conjunto com outros dados geofísicos, permite estudar aspectos tectônicos e de evolução da litosfera, que podem ter implicações na gênese e acúmulo de reservas minerais.



O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE

IAG-USP(1) - Nelsi Côgo de Sá - nelsi@iag.usp.br

IAG-USP(2) - Naomi Ussami - naomi@iag.usp.br

IAG-USP(3) - Yára Regina Marangoni - yara@iag.usp.br

IAG-USP(4) - Eder Cassola Molina - eden@iag.usp.br

PETROBRAS - PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.

ON-RJ - OBSERVATÓRIO NACIONAL - RIO DE JANEIRO

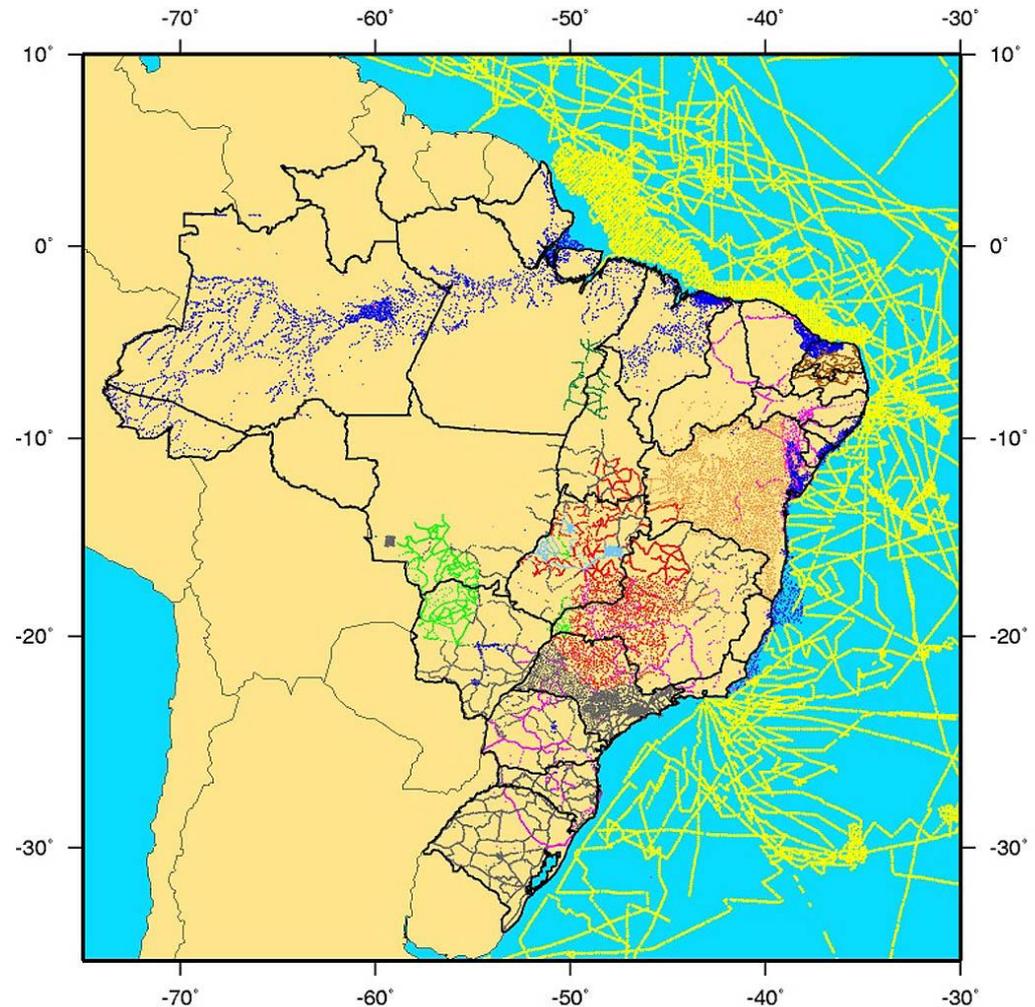
UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

UFRN - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL

UnB - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UFPR - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ



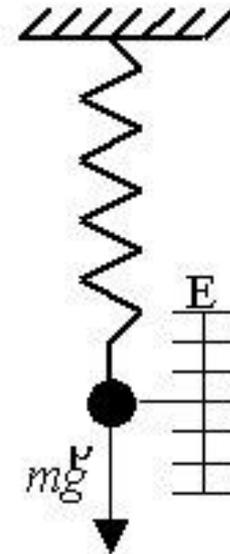
O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE

Gravímetros diferenciais – princípios gerais

Gravímetros diferenciais são projetados para medir a diferença de aceleração de gravidade entre dois pontos. A maior parte destes equipamentos é baseada em um sistema do tipo massa-mola.

O princípio básico do sistema é o da deformação do conjunto massa-mola em resposta a uma força atuante. Quanto maior for a força, maior será o comprimento da mola, e vice-versa.

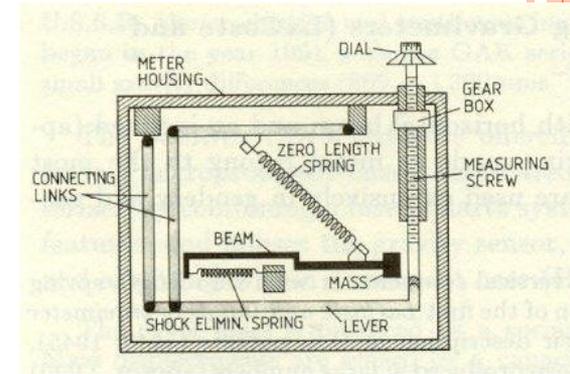
Quando um sistema deste tipo é levado a um segundo ponto, qualquer variação de g vai acarretar uma variação no comprimento da mola, que pode ser detectado e quantificado. Assim, conhecendo-se o valor de g em um ponto, pode-se obter o valor em outro ponto qualquer.



O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE

Gravímetros diferenciais –LaCoste & Romberg

Este gravímetro consiste de uma haste presa por uma mola especial, conectada a um parafuso micrométrico. Um feixe de luz incide sobre a haste, e atinge uma ocular, de modo a se localizar em uma determinada posição quando a haste estiver em uma situação estável pré-definida.



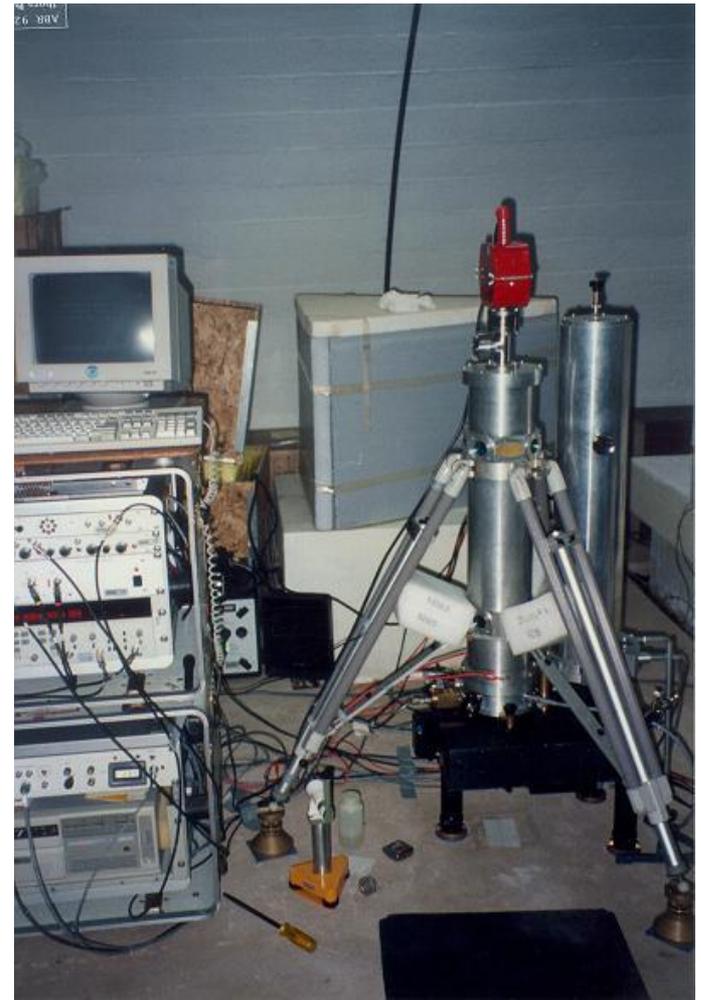
O operador deve nivelar o equipamento, e em seguida observar a posição do feixe de luz em uma escala graduada, girando o parafuso micrométrico até que o feixe atinja a posição pré-estabelecida pelo fabricante. A quantidade de voltas dadas no parafuso está relacionada à variação de g entre o local de referência e o local de observação.



O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE

Gravímetros absolutos – equipamentos que utilizam interferometria a laser

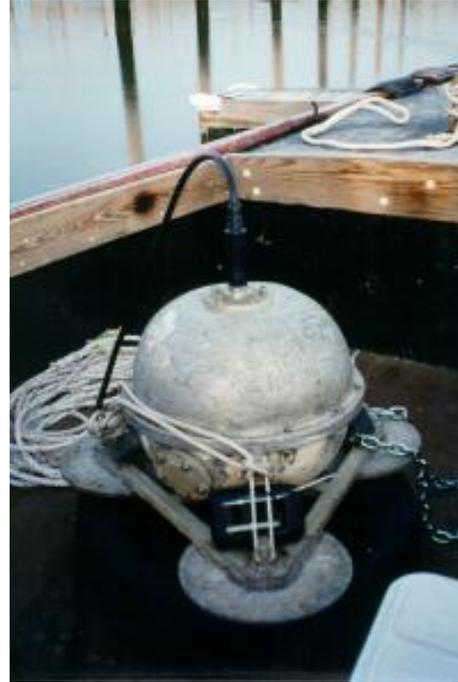
Neste tipo de equipamento, uma massa é lançada verticalmente, quando intercepta alguns feixes horizontais de laser, separados por uma distância determinada com precisão. O movimento da massa é cronometrado durante a subida e a descida, por meio de um relógio atômico extremamente preciso. A operação é repetida por milhares de vezes para se obter um valor preciso de g .



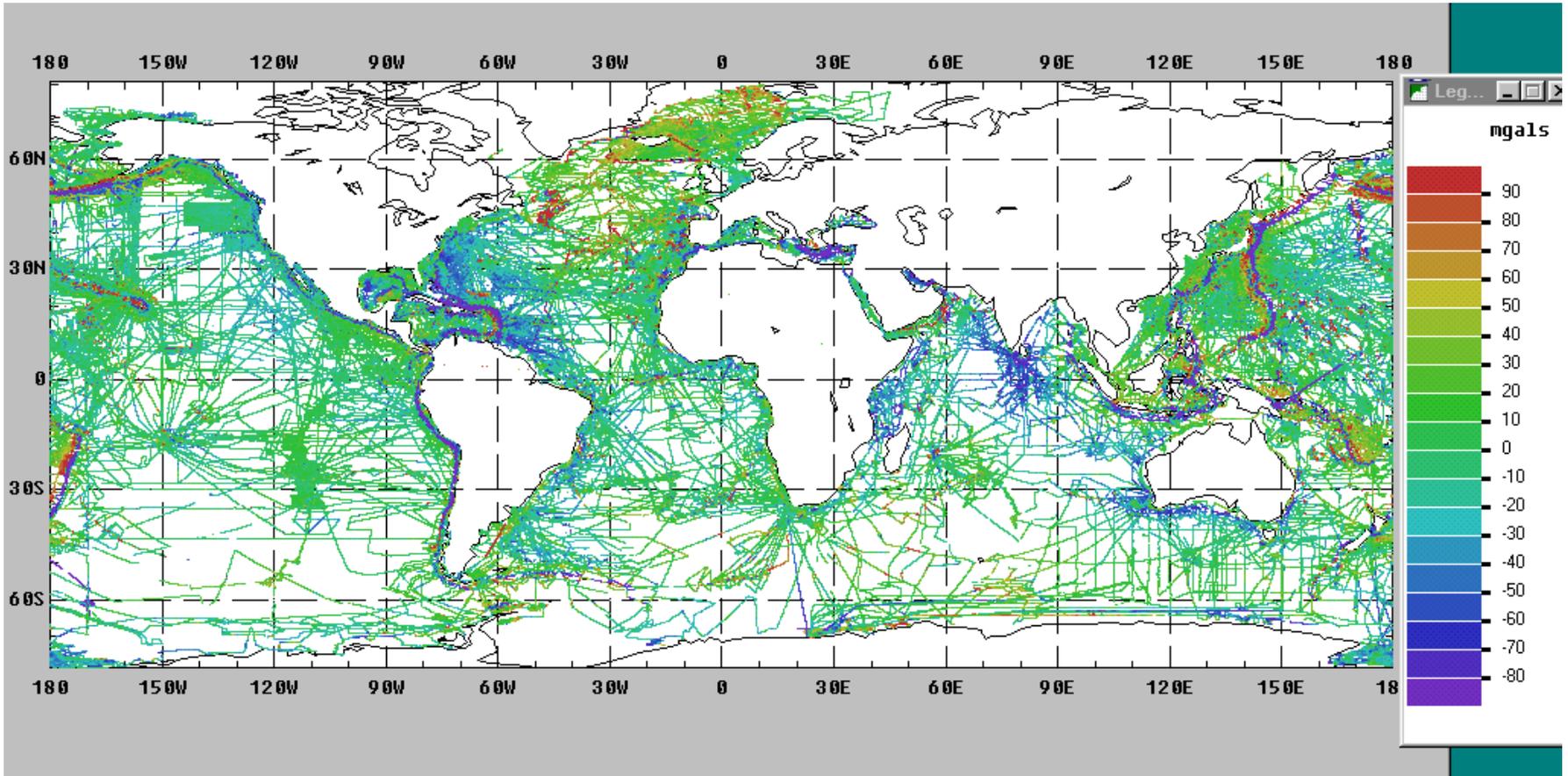
O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE

Gravimetria marinha

- Necessita de uma plataforma flutuante e um sistema de navegação e estabilização
- Correções a serem aplicadas para remover o efeito do movimento do navio: dependência das coordenadas e velocidade da embarcação
- Necessidade do ajustamento das trilhas em função dos pontos de cruzamento entre os cruzeiros

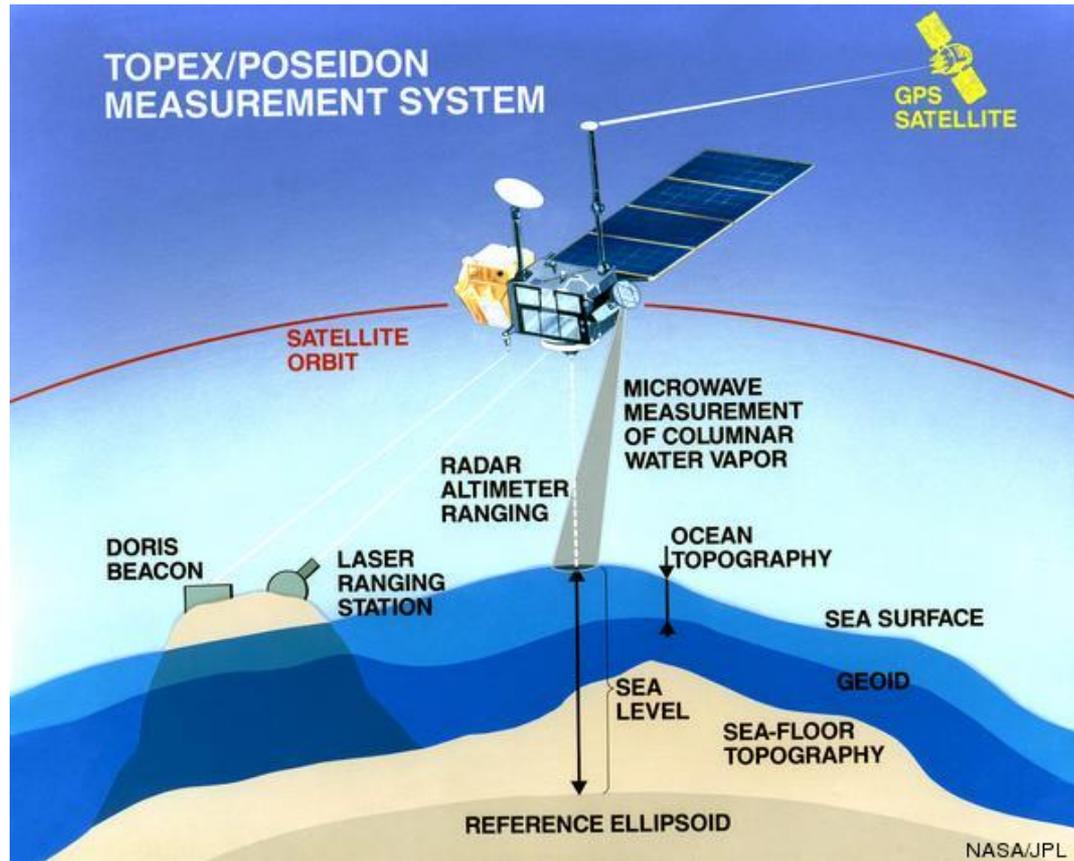


O CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE



Altimetria por satélite

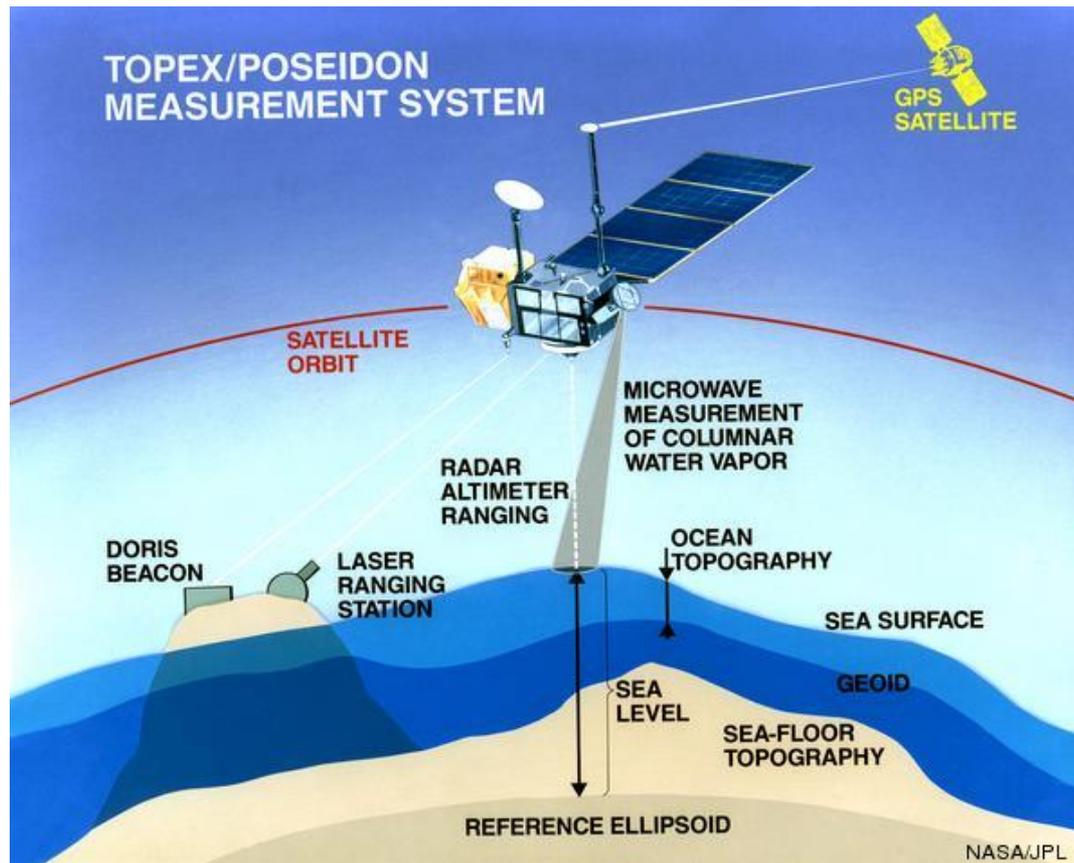
A superfície do oceano segue uma equipotencial do campo da gravidade terrestre. Em primeira aproximação, esta superfície equipotencial seria uma esfera, caso a distribuição de massa da Terra fosse homogênea e ela não tivesse rotação.



Altimetria por satélite

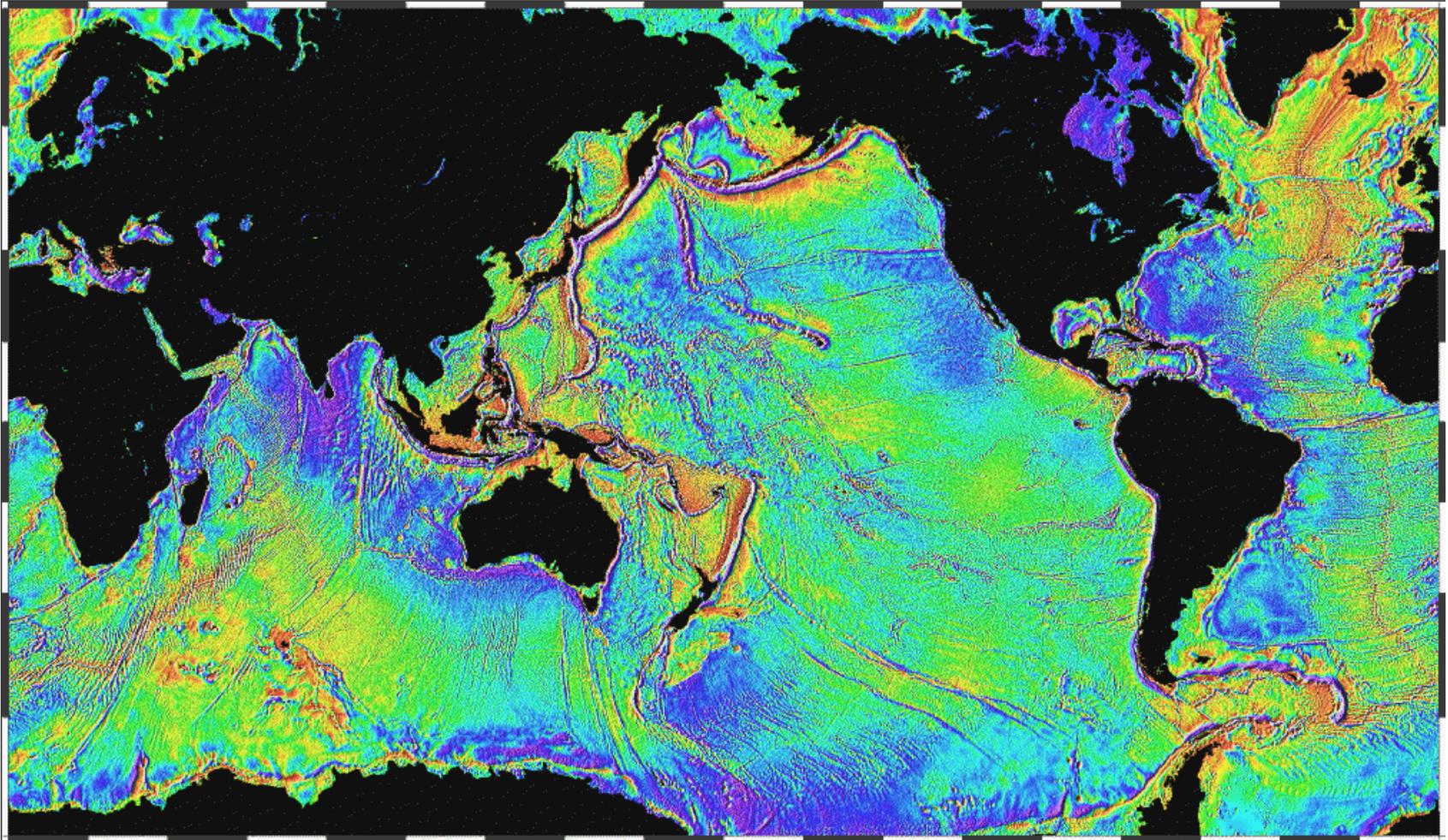
A rotação faz com que a forma esférica tenda a elipsoidal, e a distribuição irregular de massa faz com que a superfície da água do mar desvie desta forma elipsoidal em até 100 metros em algumas localidades.

Um monte submarino, por exemplo, tipicamente tem 20 km de raio e 2000m de altura, e acaba por deformar a geometria da água do mar ao seu redor.



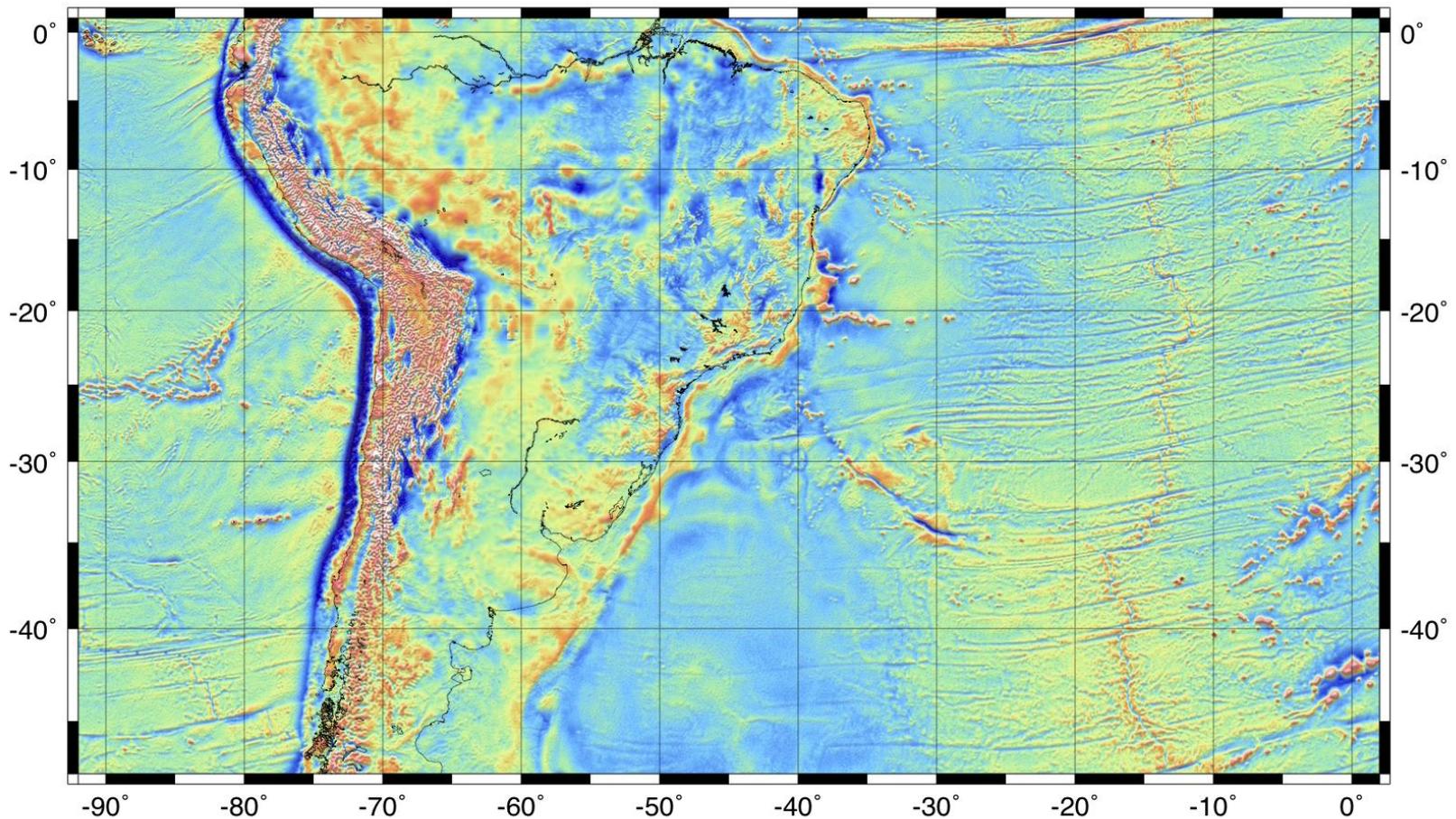
Altimetria por satélite

O campo de gravidade mapeado por altimetria por satélite



Altimetria por satélite

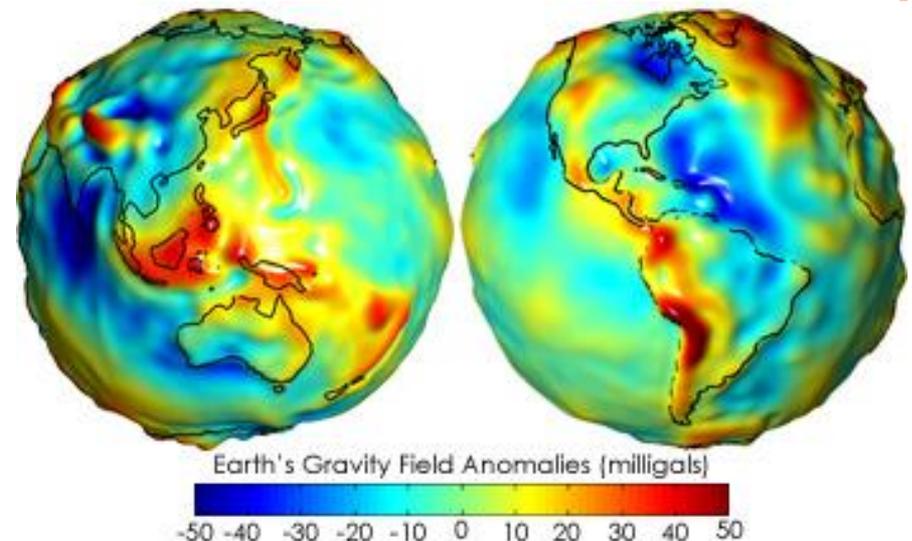
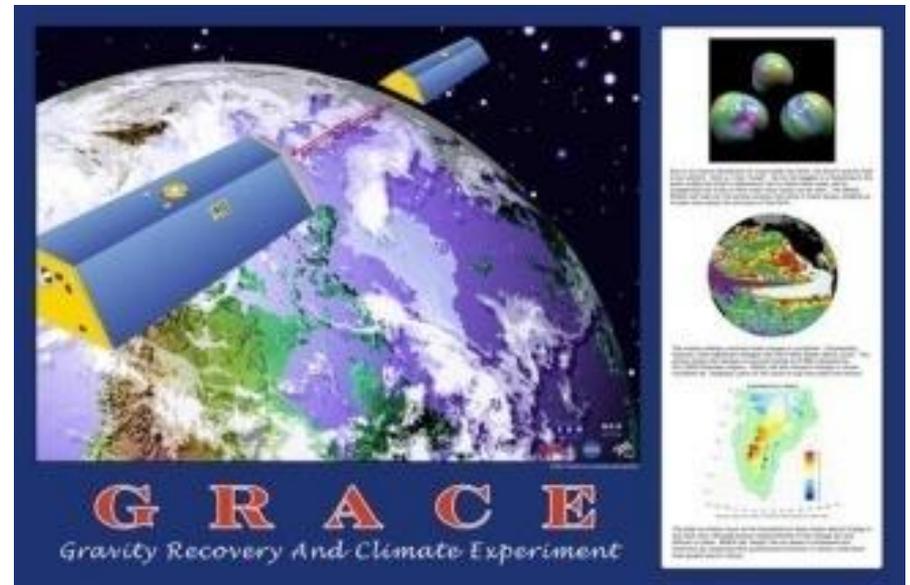
O campo de gravidade mapeado por altimetria por satélite, integrado com dados continentais



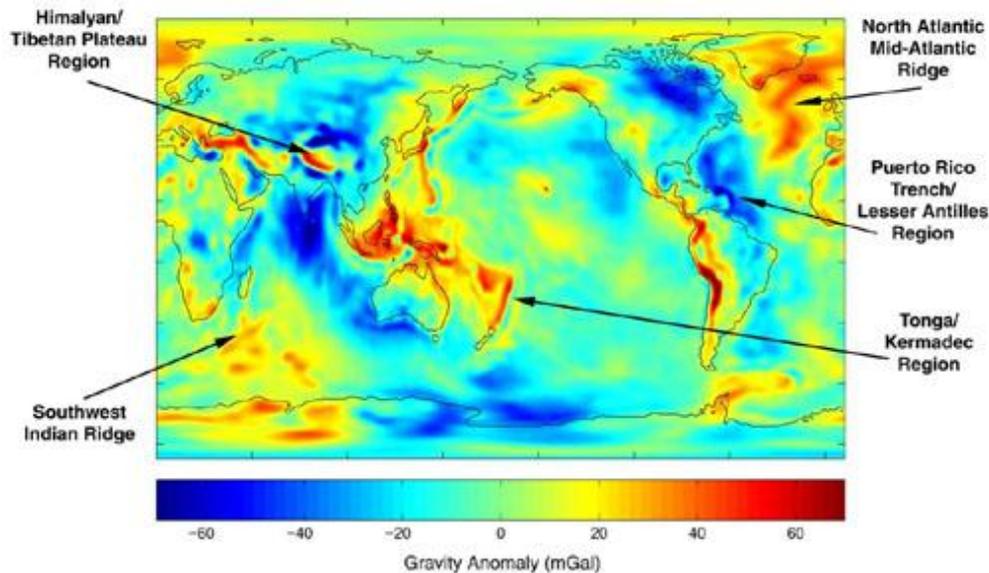
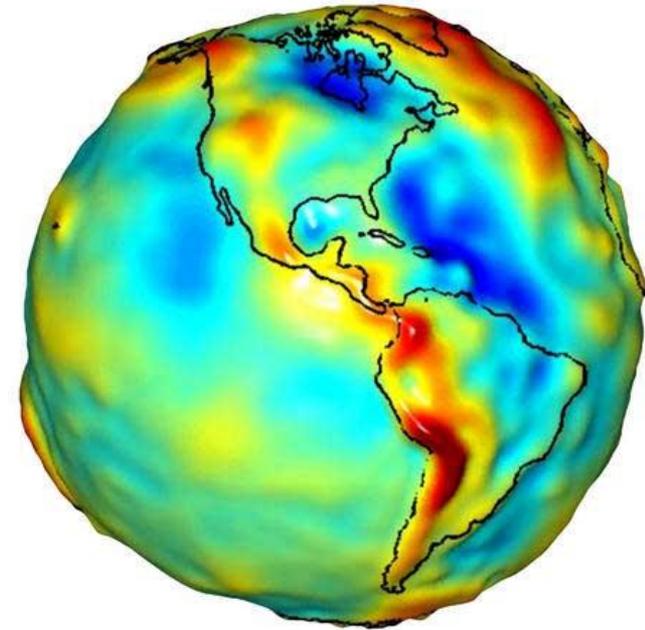
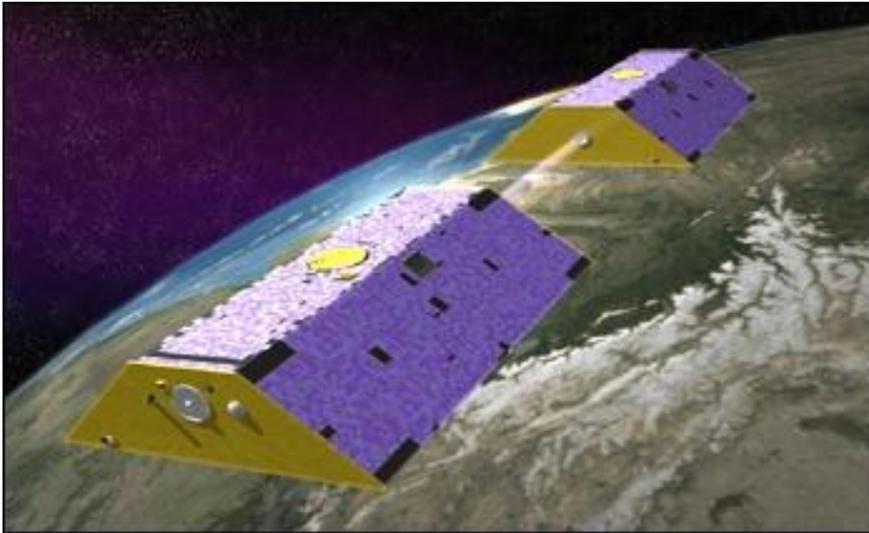
David T. Sandwell and Walter H. F. Smith, Marine Gravity Anomaly from Satellite Altimetry, Version 19.1

OS SATÉLITES GRACE

Dois satélites gêmeos, orbitando a Terra a uma distância de 220 km entre si; as medidas de variação da distância entre eles é feita com precisão melhor do que 10^{-9} m.

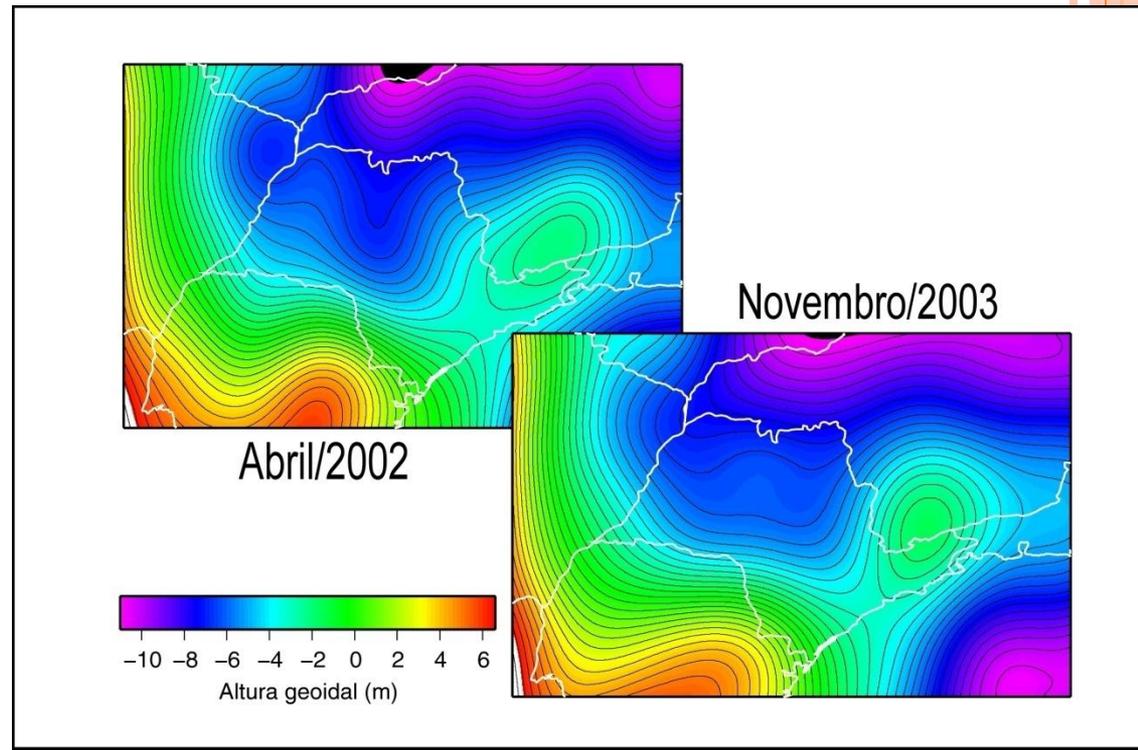
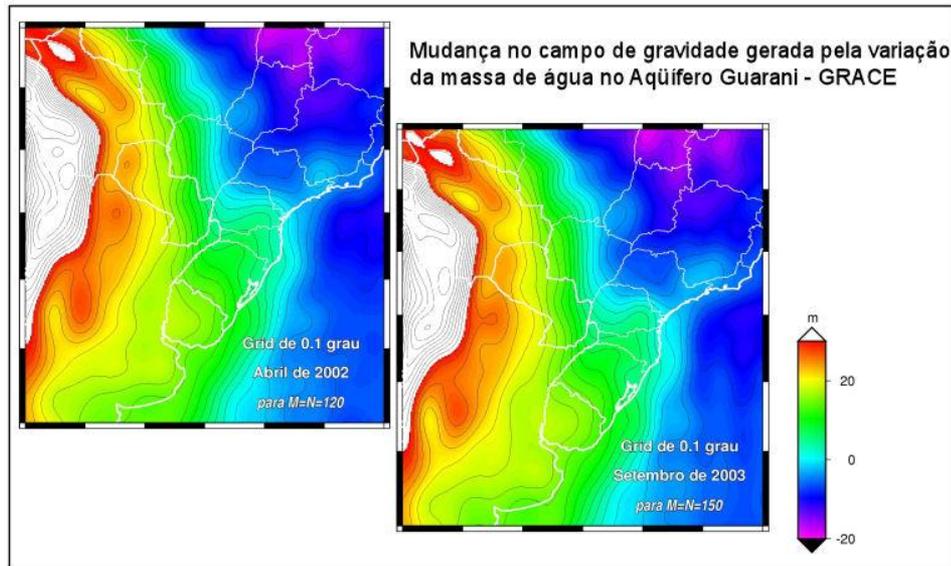


OS SATÉLITES GRACE

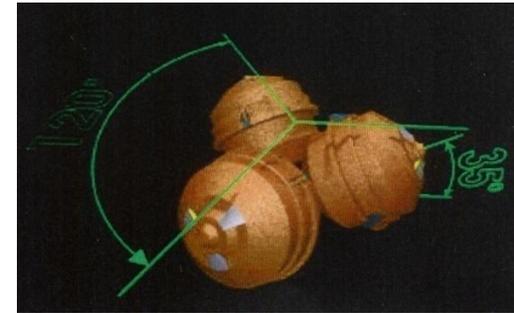
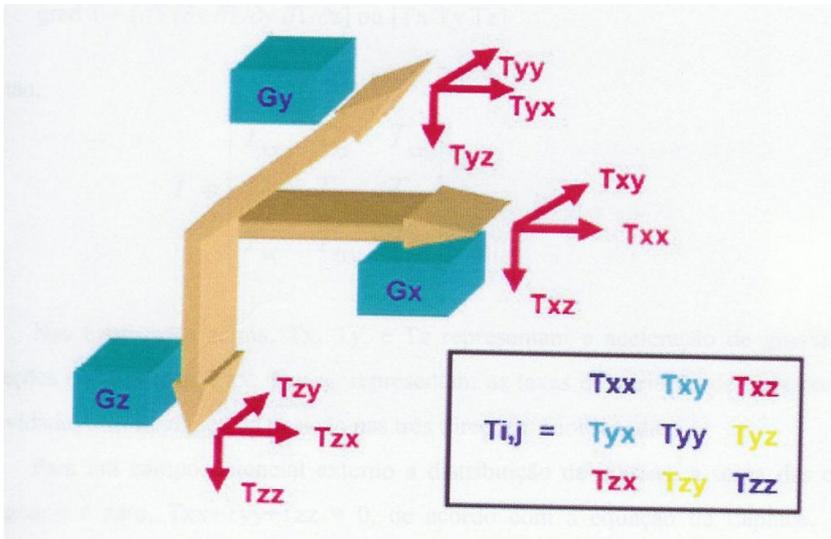


O uso dos dados do GRACE permitem uma melhor definição do campo de gravidade terrestre e delineia com boa precisão diversas estruturas da Terra.

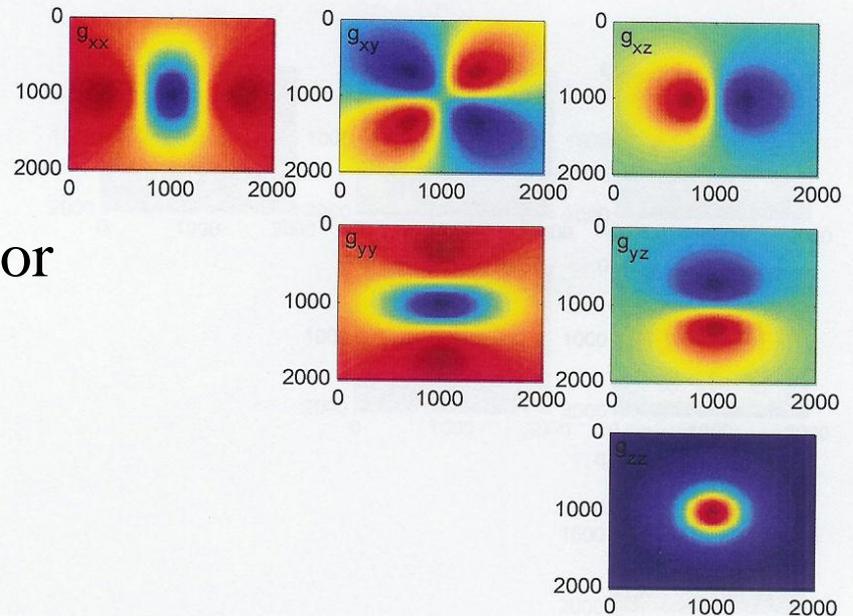
OS SATÉLITES GRACE



GRADIOMETRIA GRAVIMÉTRICA - PRINCÍPIOS



Mede-se as componentes do tensor gradiente gravimétrico; estas componentes estão normalmente associadas às bordas e à profundidade das estruturas mais superficiais e marcantes da região.



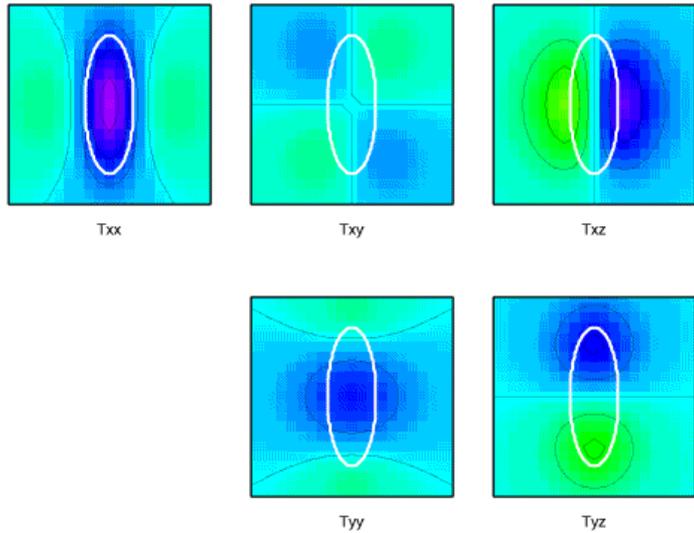
GRADIOMETRIA GRAVIMÉTRICA – AQUISIÇÃO



Montagem do equipamento na aeronave

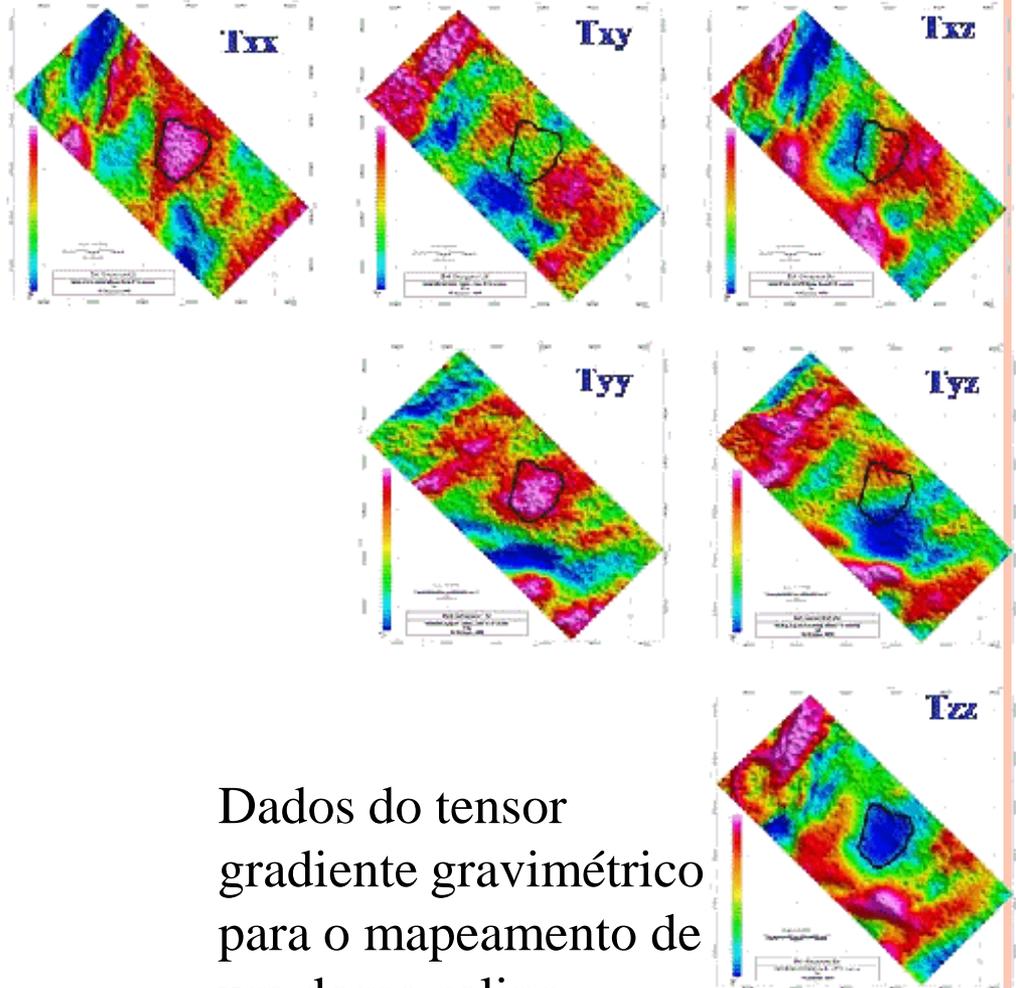
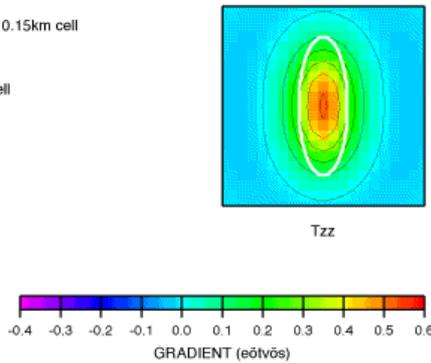
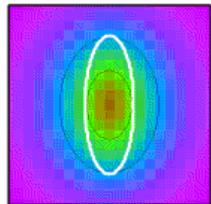


GRADIOMETRIA GRAVIMÉTRICA - RESULTADOS



BASIC CONSTRUCTS: ELPS

model surface = 22.5km x 22.5km grid, 0.15km cell
 reference depth = 3.3km
 density contrast = 0.05g/cm³
 solution = 15km x 15km grid, 0.75km cell

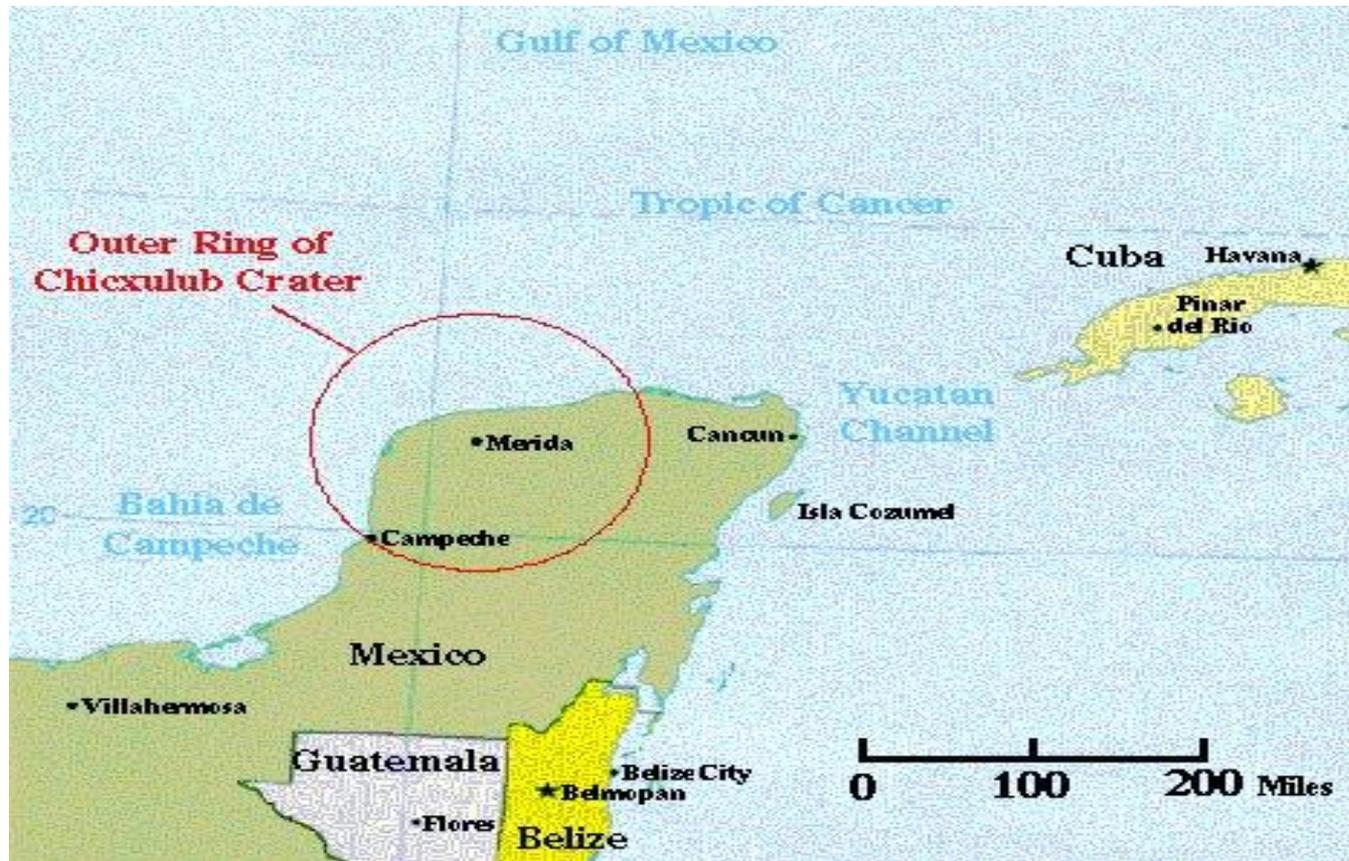


Resposta teórica esperada para um elipsóide

Dados do tensor gradiente gravimétrico para o mapeamento de um domo salino offshore

A CRATERA DE CHICXULUB

Exemplo de aplicações: Cratera de impacto de Chicxulub, proposta como sendo resultado do evento de extinção em massa do período K-T



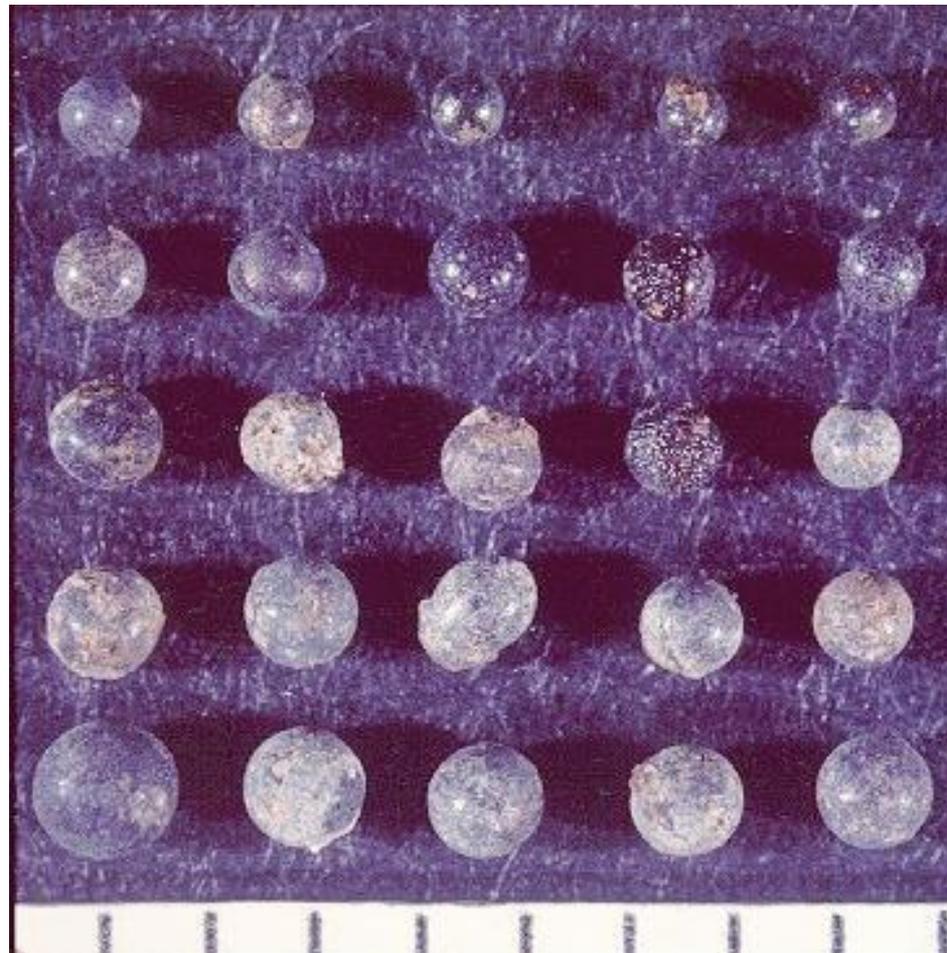
INVESTIGAÇÃO DA CRATERA DE CHICXULUB

Seção geológica onde se pode encontrar a fronteira K-T, no Texas. Os depósitos de sedimentos grosseiros, com clastos podendo atingir 1m, estão sob uma camada fina de sedimentos finos que apresentam anomalias de irídio, ouro, arsênico, antimônio e selênio.



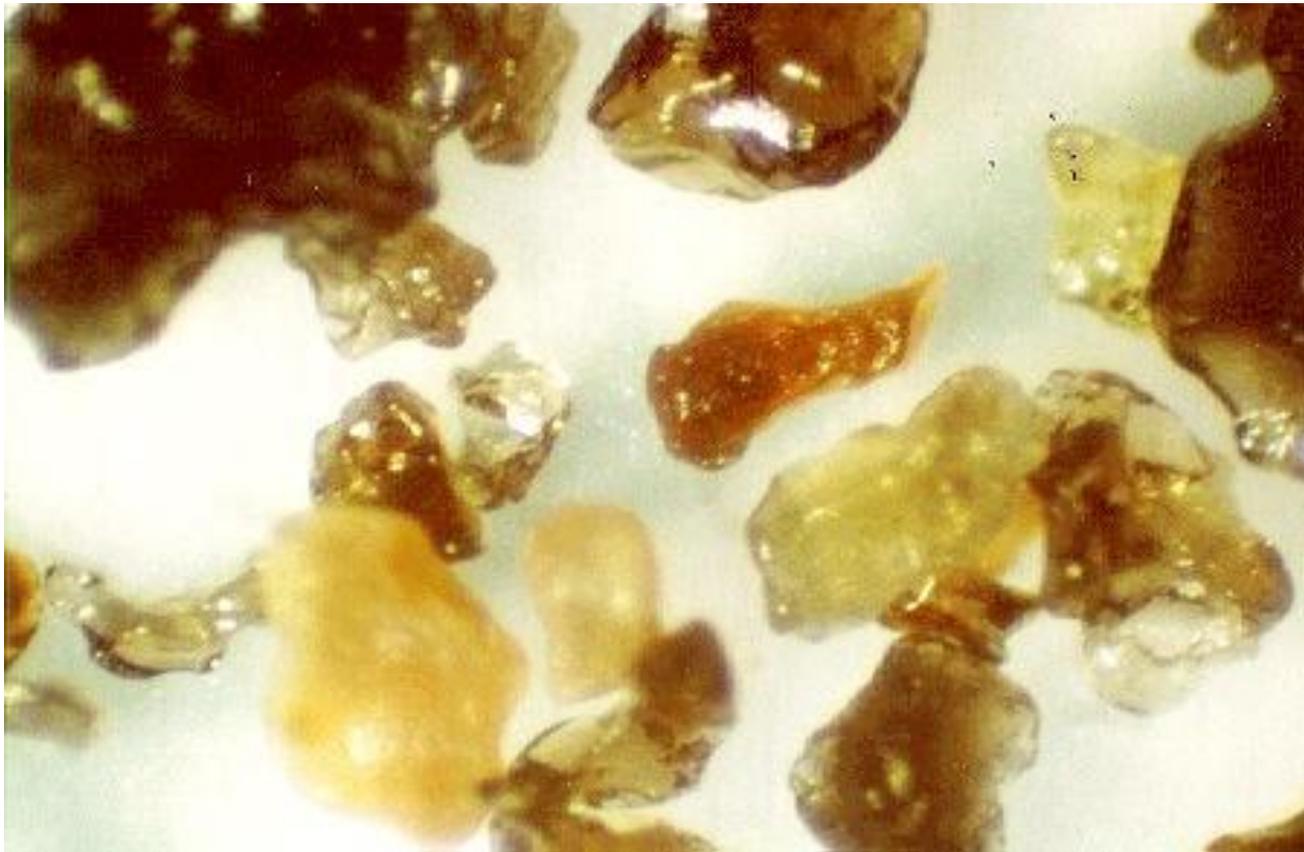
INVESTIGAÇÃO DA CRATERA DE CHICXULUB

A presença de tectitos alterados produzidos pelo impacto em Chicxulub é indicativa de uma grande colisão. As marcas na escala inferior estão espaçadas a cada milímetro.



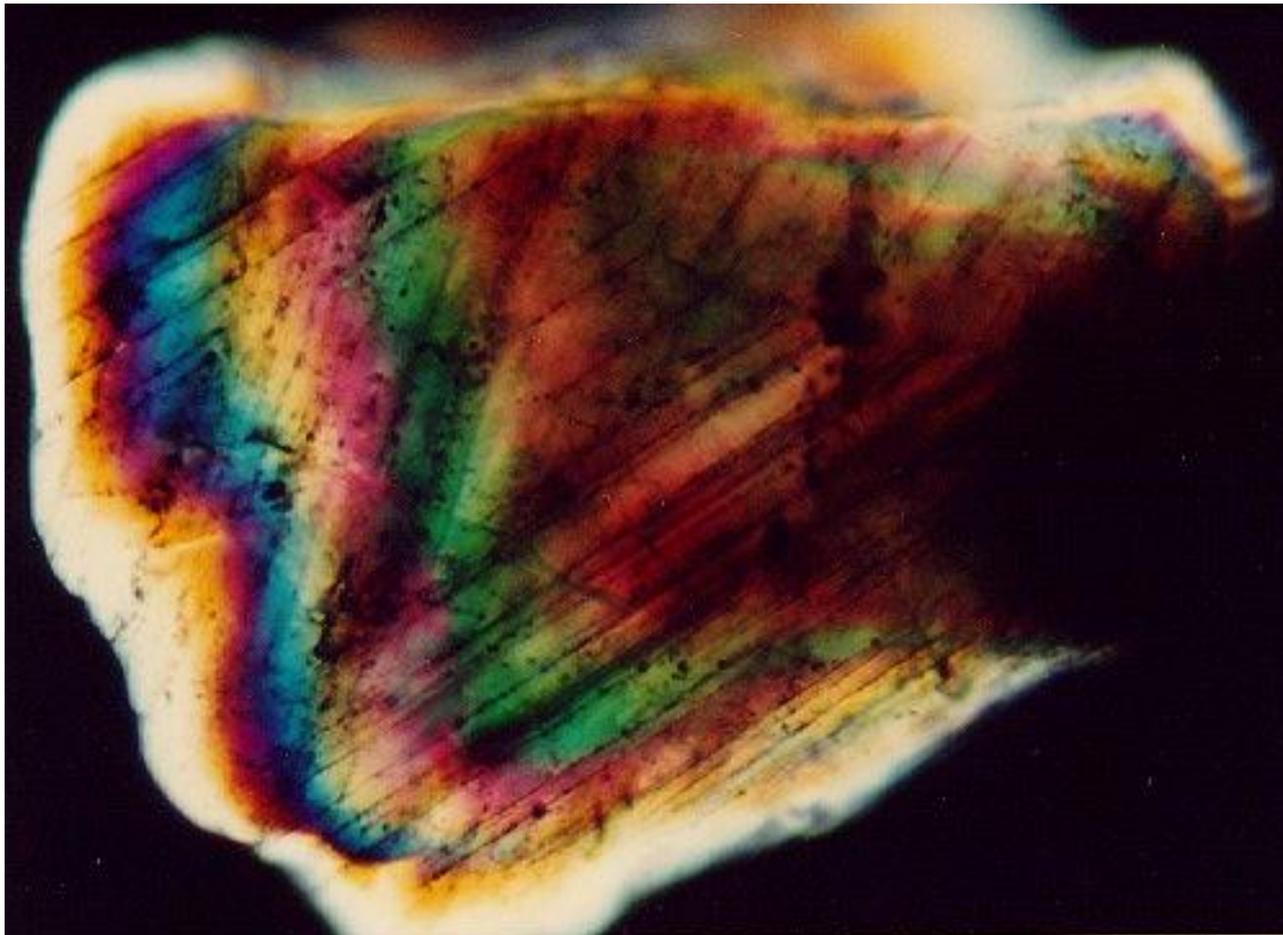
INVESTIGAÇÃO DA CRATERA DE CHICXULUB

Tectitos inalterados (em cor marrom na imagem) e parcialmente alterados (amarelo e âmbar) encontrados na camada K-T em Mimbral, México.



INVESTIGAÇÃO DA CRATERA DE CHICXULUB

A presença de grãos de quartzo mostrando evidências de ondas de choque (aqui temos pelo menos 8 ondas distintas, representadas pelas cores) é conclusiva quanto ao impacto.



O grão de quartzo aqui fotografado possui dimensão de 0,32 mm.

INVESTIGAÇÃO DA CRATERA DE CHICXULUB

Hipótese: choque de um meteoróide, há 65 milhões de anos, proveniente de um cometa ou asteróide, que teria levado à extinção de 70% das formas de vida na Terra. O corpo deveria ter de 6 a 15 km de diâmetro.



INVESTIGAÇÃO DA CRATERA DE CHICXULUB

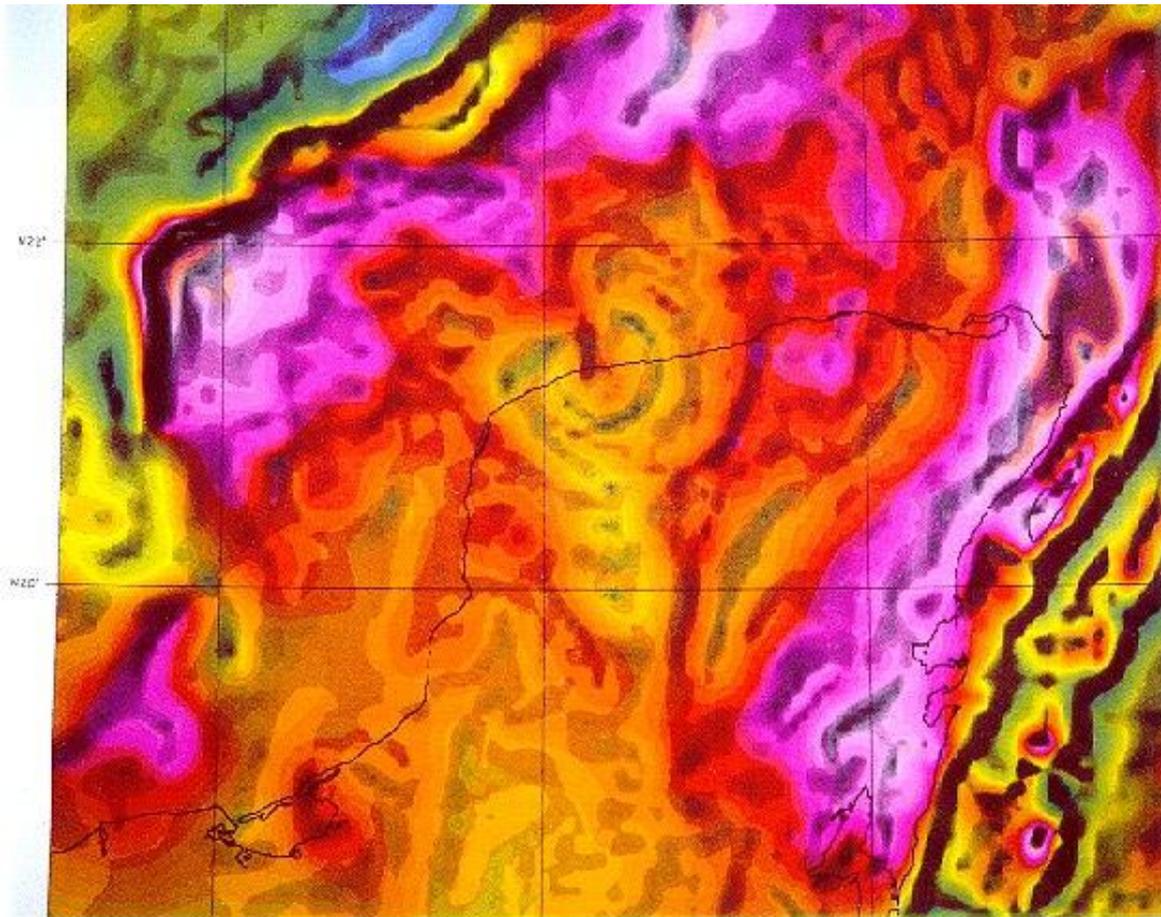
A cratera estaria submersa, (1600 m de profundidade) inicialmente inacessível à observação direta, sem uma expressão topográfica acentuada que permitisse sua imediata identificação.

Alguns indícios geológicos existem na região, como anomalia de irídio, presença de tectitos, grãos de quartzo muito deformados, estruturas de quartzo formadas a altíssimas pressões.

Se pensarmos no evento causador da cratera, deveríamos esperar que ela se constituísse em uma feição aprox. circular no embasamento rochoso, que foi preenchida por sedimentos após o impacto, devendo portanto, gerar uma anomalia gravimétrica negativa (os sedimentos que preencheriam a cratera têm densidade menor do que as rochas que os alojam).

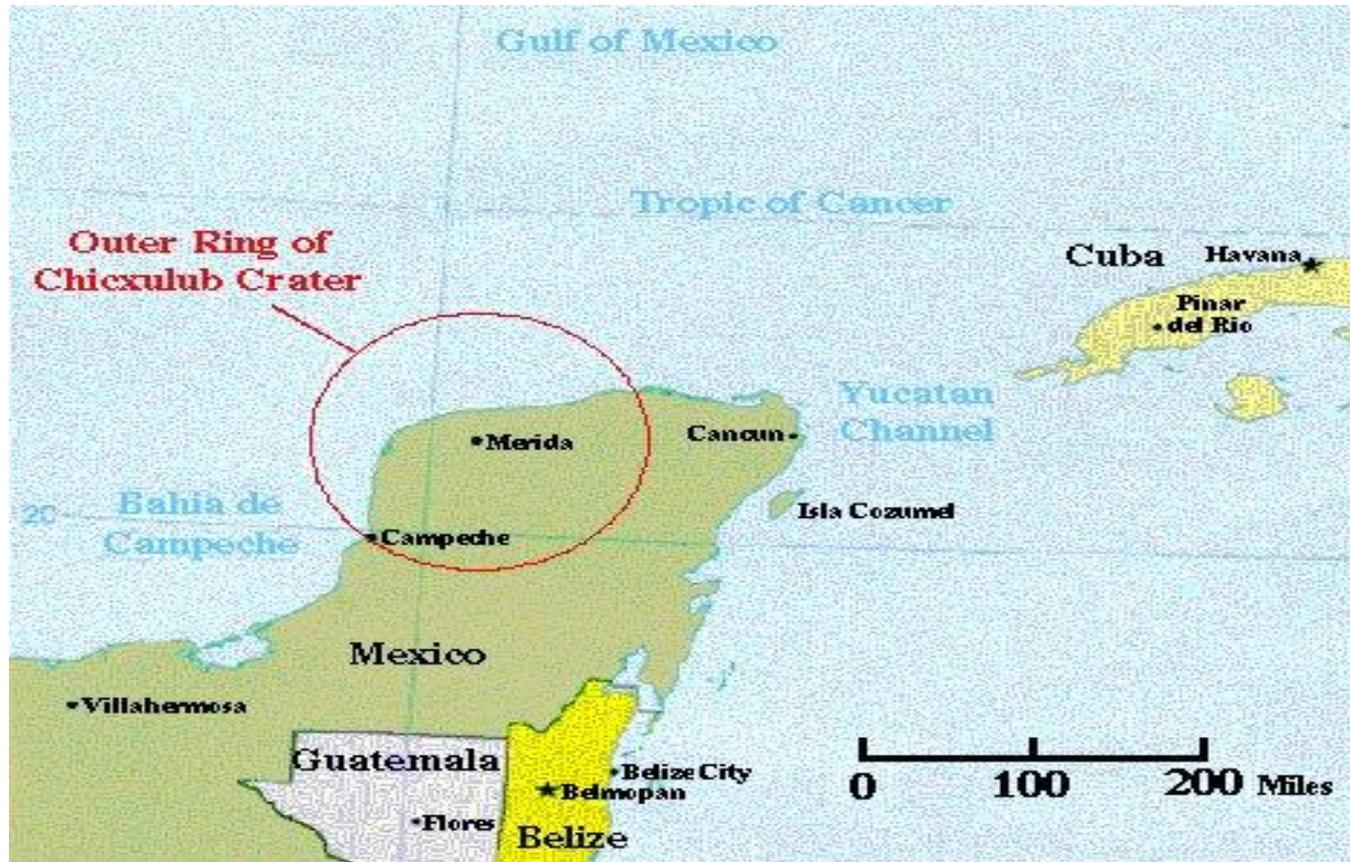
INVESTIGAÇÃO DA CRATERA DE CHICXULUB

A determinação do padrão gravimétrico da região mostra um baixo associado à cratera, visto aqui com o gradiente da anomalia superposto, para melhor identificar as bordas das feições.



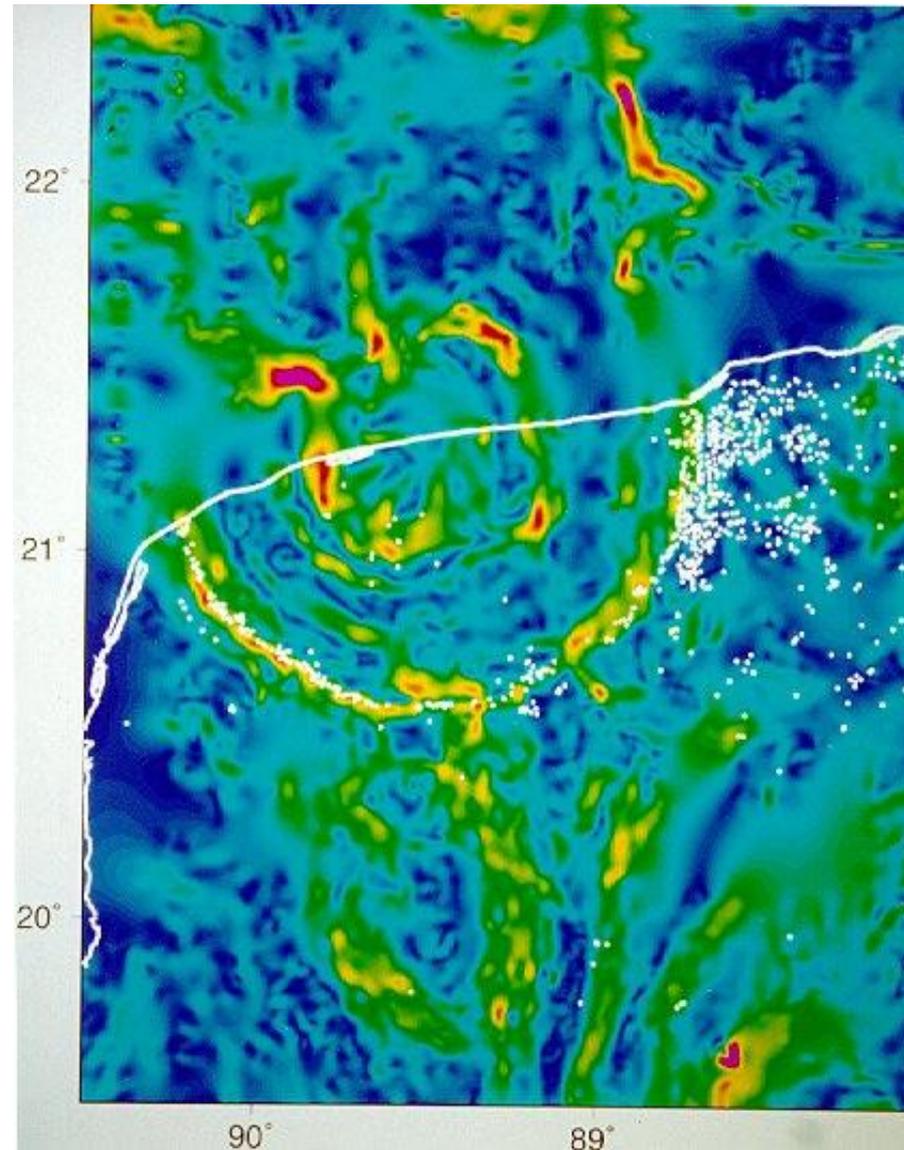
Escala de cores:
roxo e vermelho
indicam valores
elevados; amarelo,
verde e azul,
valores baixos de
anomalia
gravimétrica.

A CRATERA DE CHICXULUB



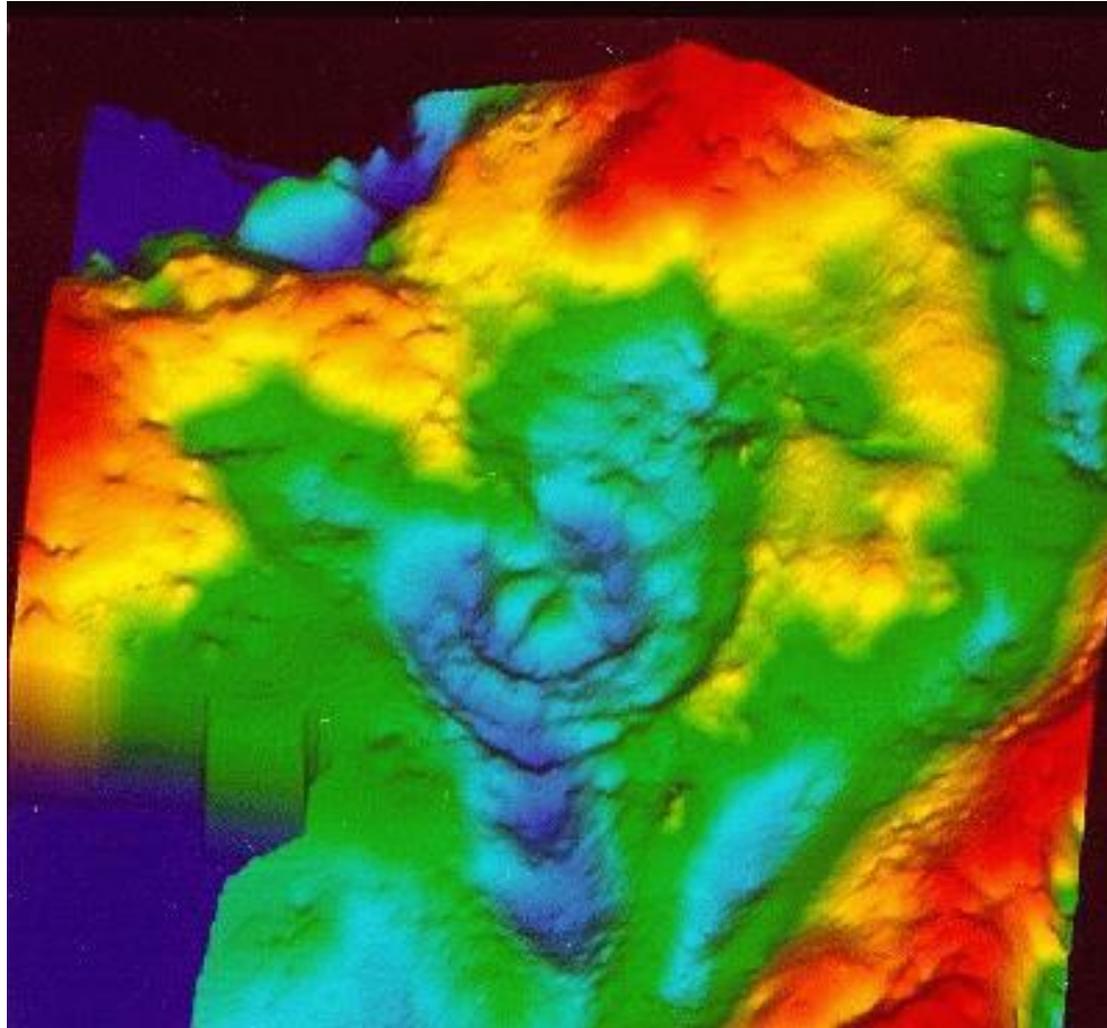
INVESTIGAÇÃO DA CRATERA DE CHICXULUB

O gradiente da anomalia Bouguer, indicando as regiões de maior variação da grandeza, permite melhor identificar as bordas das feições. A cratera apresenta 200 a 300 km de extensão.



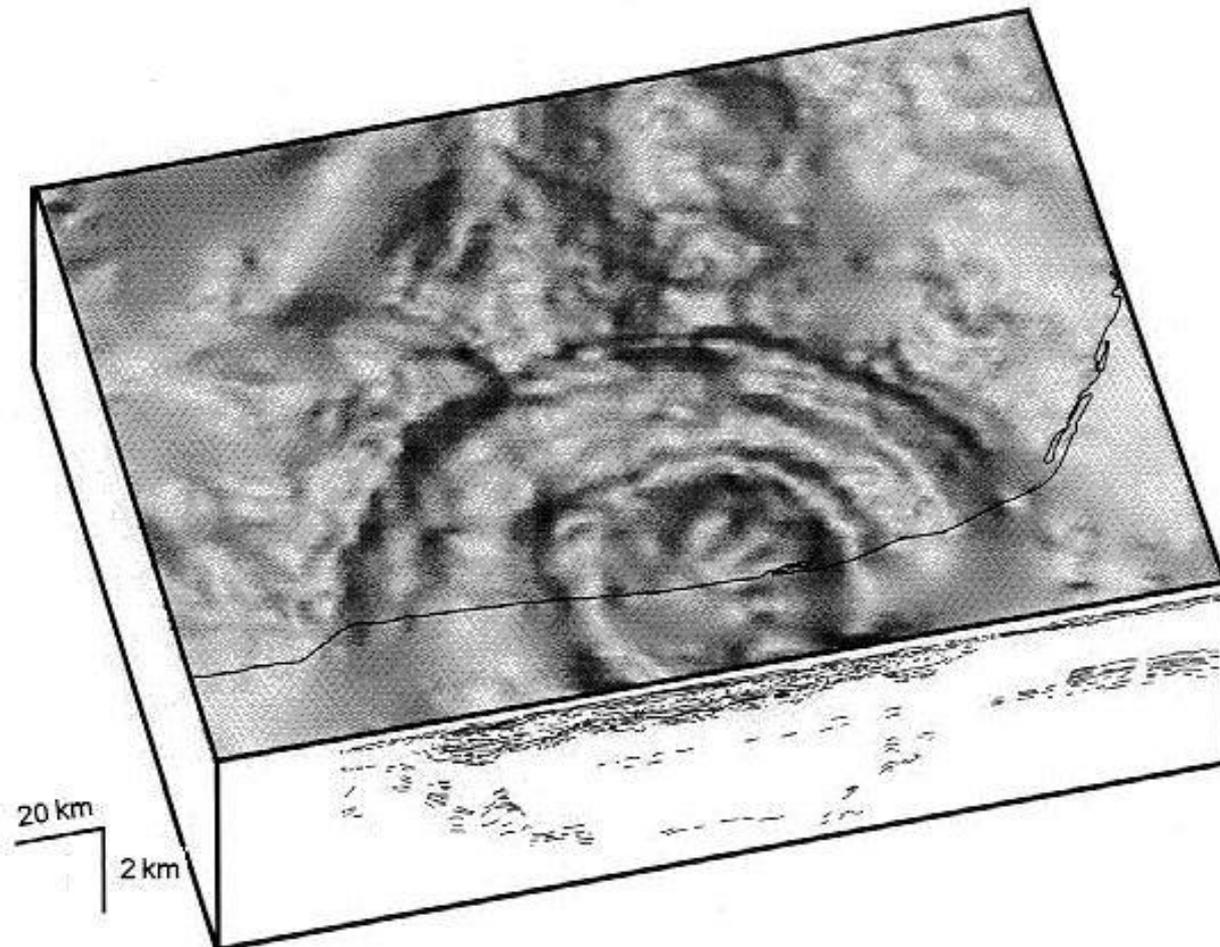
INVESTIGAÇÃO DA CRATERA DE CHICXULUB

Visualização em 3D da anomalia gravimétrica negativa em Chicxulub. A figura está orientada com o Norte apontando para cima.



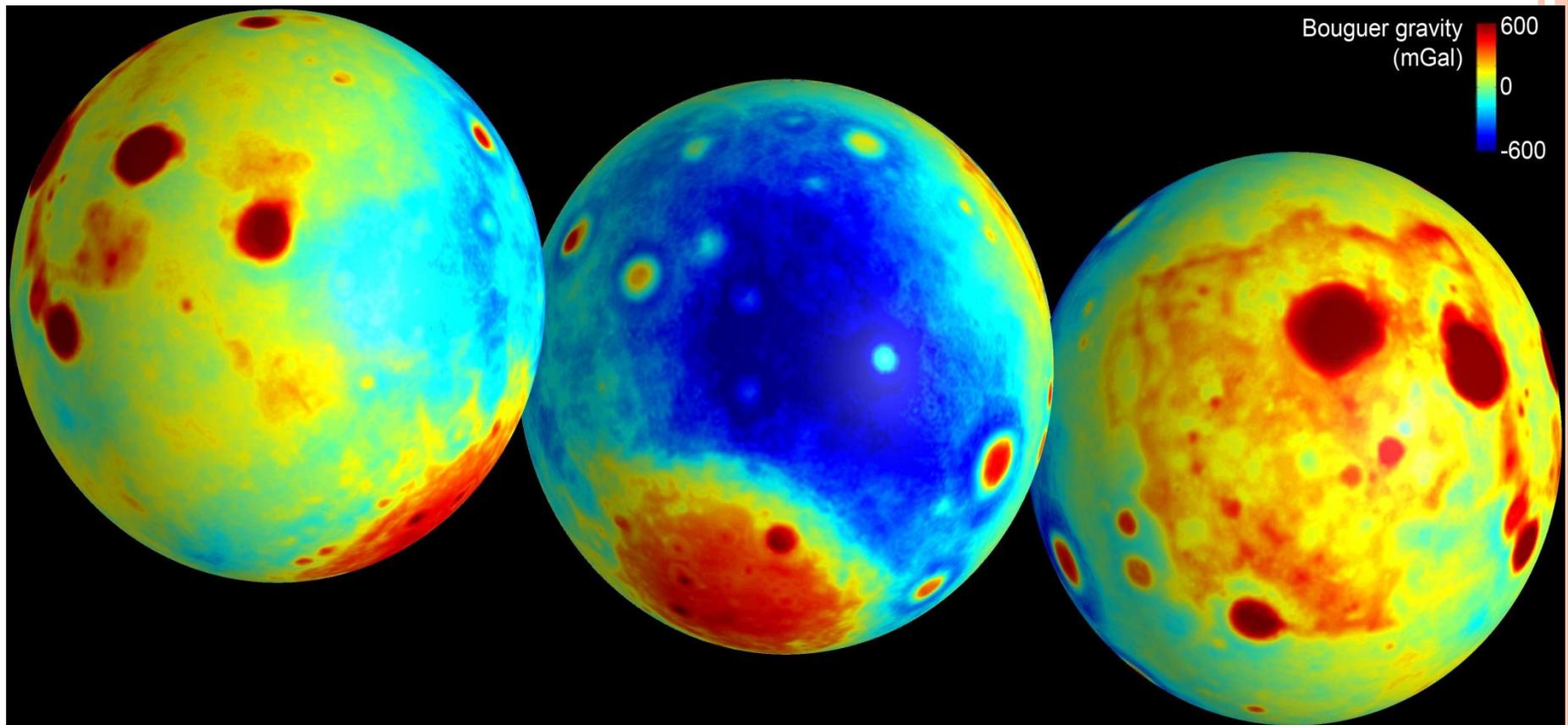
INVESTIGAÇÃO DA CRATERA DE CHICXULUB

A investigação sísmica permite obter um padrão similar ao da anomalia gravimétrica. A parte inferior da figura representa o Norte. Estamos olhando, assim, do mar para o continente.



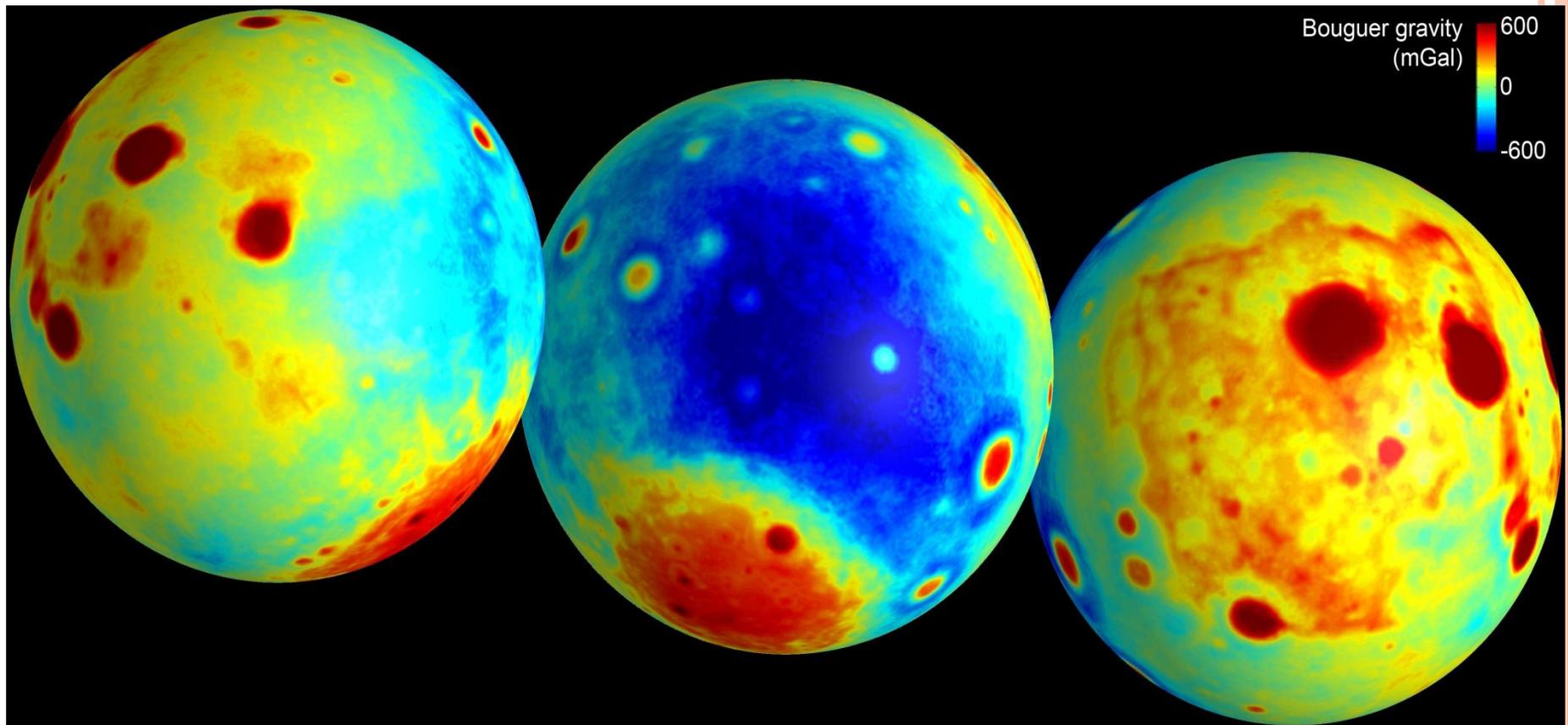
O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA

Entre setembro de 2011 e dezembro de 2012, duas sondas espaciais americanas, oficialmente chamadas GRAIL A e GRAIL B (mas popularmente conhecidas como Ebb e Flow), orbitaram nosso satélite natural a uma altitude de 55 km, distanciadas de aproximadamente 200 km entre si.



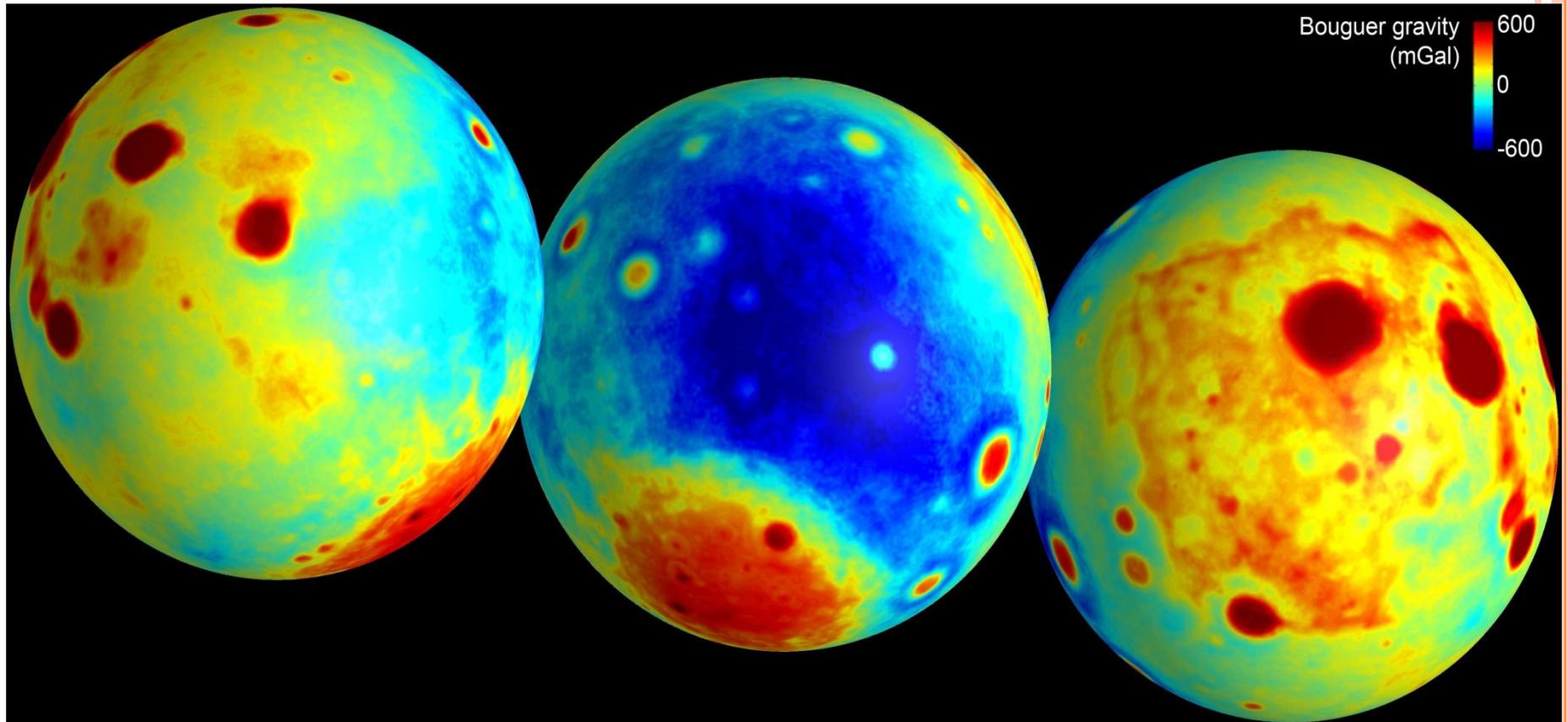
O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA

Estes dados ajudaram a vislumbrar, dentre várias coisas, uma solução para um problema muito antigo, relacionado à origem do Mar das Tormentas (*Ocean of Storms*, ou *Oceanus Procellarum*). Imaginava-se que, como a maioria dos *mares* lunares, esta estrutura tinha sido formada pelo impacto de um asteroide ou corpo similar. Se assim fosse, esta seria a maior estrutura de impacto da Lua.



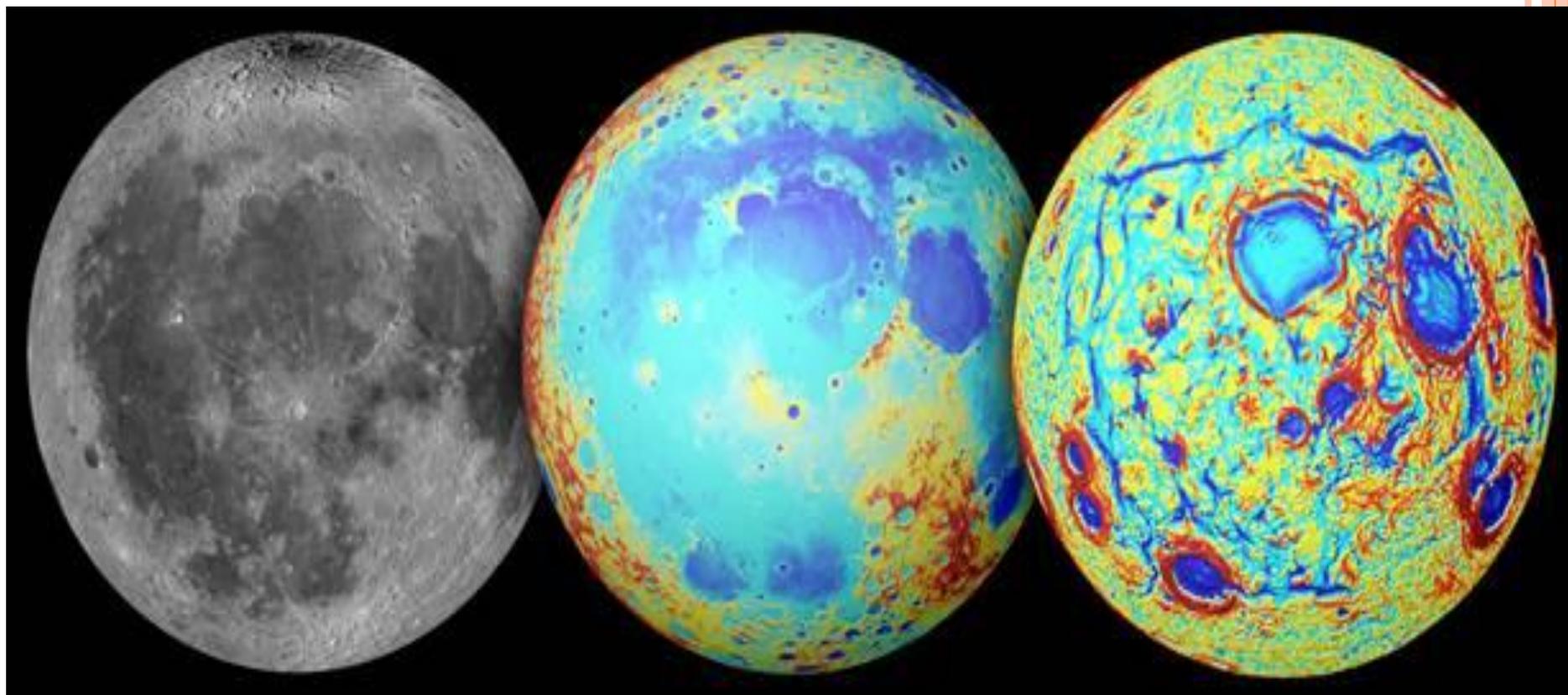
O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA

Ocorre que, após os dados da missão GRAIL terem sido processados, os cientistas começaram a acreditar em outra possibilidade: o Mar das Tormentas ser produto do vulcanismo lunar. Mares, ou *mare* em latim, são vastas regiões planas da superfície lunar, que acredita-se terem sido geradas pelo impacto de corpos externos.



O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA

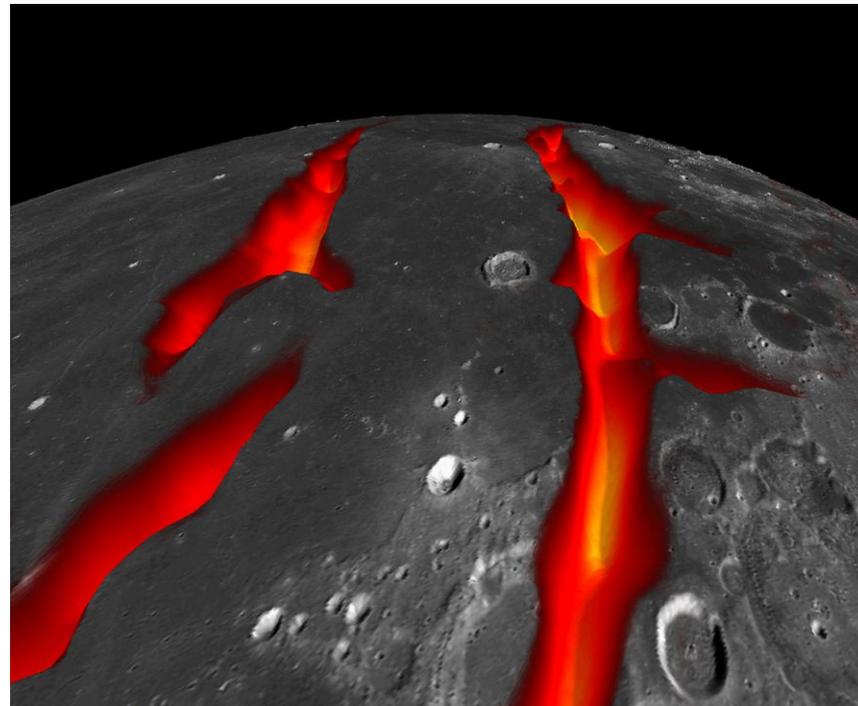
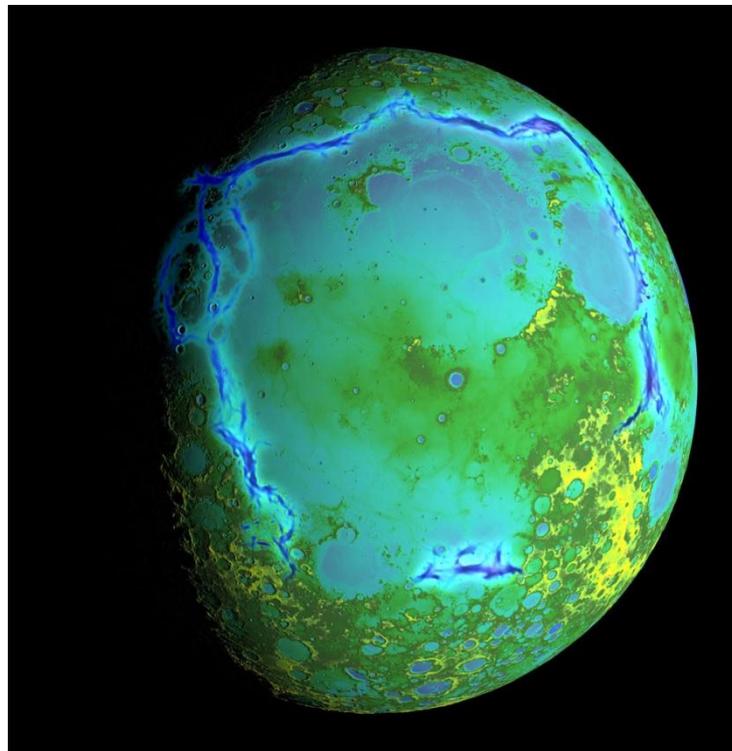
Maria Zuber, cientista da equipe da missão GRAIL, afirma: "We interpret the gravity anomalies discovered by GRAIL as part of the lunar magma plumbing system -- the conduits that fed lava to the surface during ancient volcanic eruptions." (Interpretamos as anomalias gravimétricas mapeadas pela missão GRAIL como originadas por um sistema de condutos vulcânicos que trouxeram lava à superfície durante erupções vulcânicas ocorridas no passado)



O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA

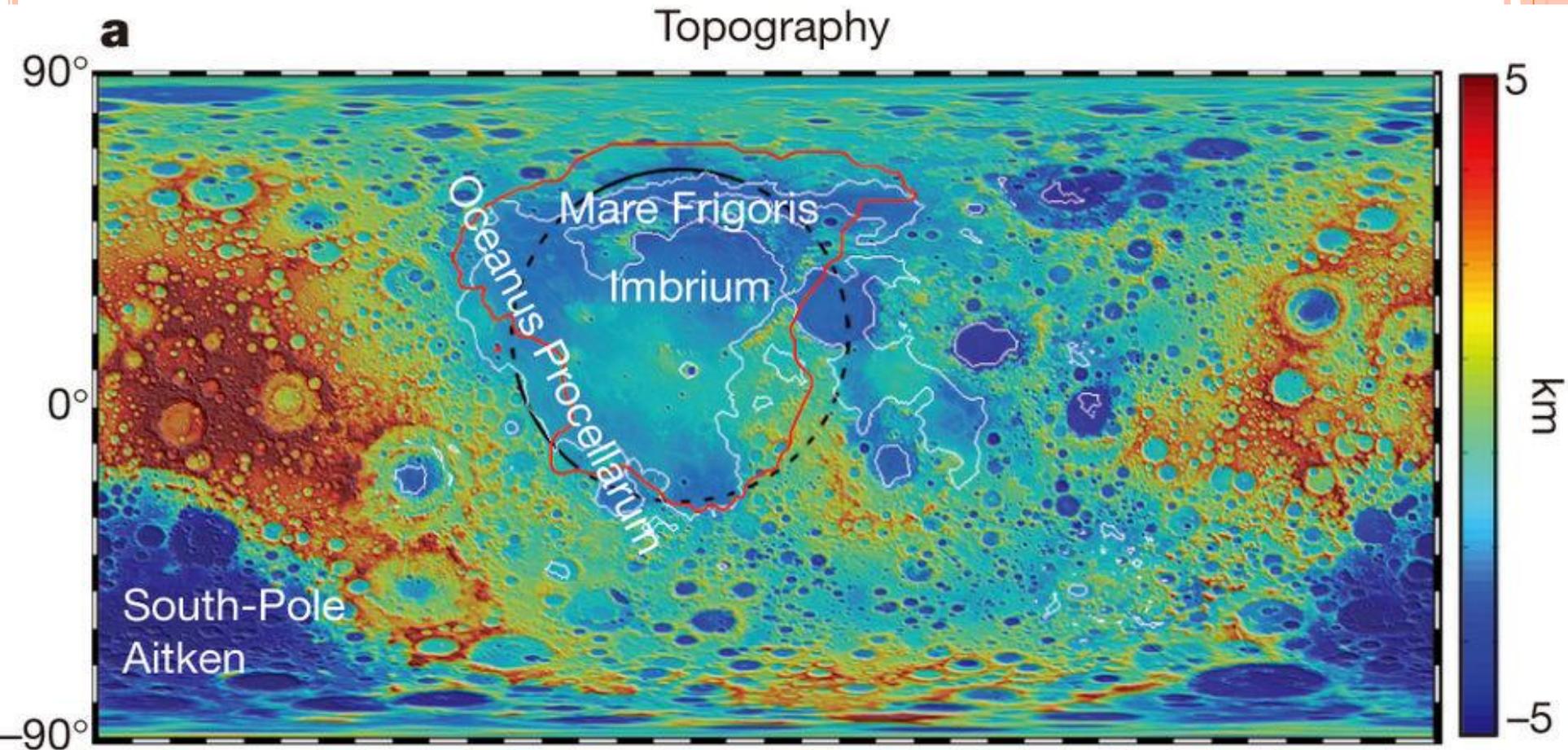
Outra interpretação é a de que movimentos no interior da Lua no passado levaram a uma concentração anômala de elementos radiogênicos no manto e na crosta na região das anomalias gravimétricas mais pronunciadas.

Seja qual for a origem, acredita-se que estas regiões delineadas pela aceleração da gravidade e suas derivadas sejam canais alimentadores de vulcanismo, que só puderam ser evidenciadas a partir deste tipo de dados.



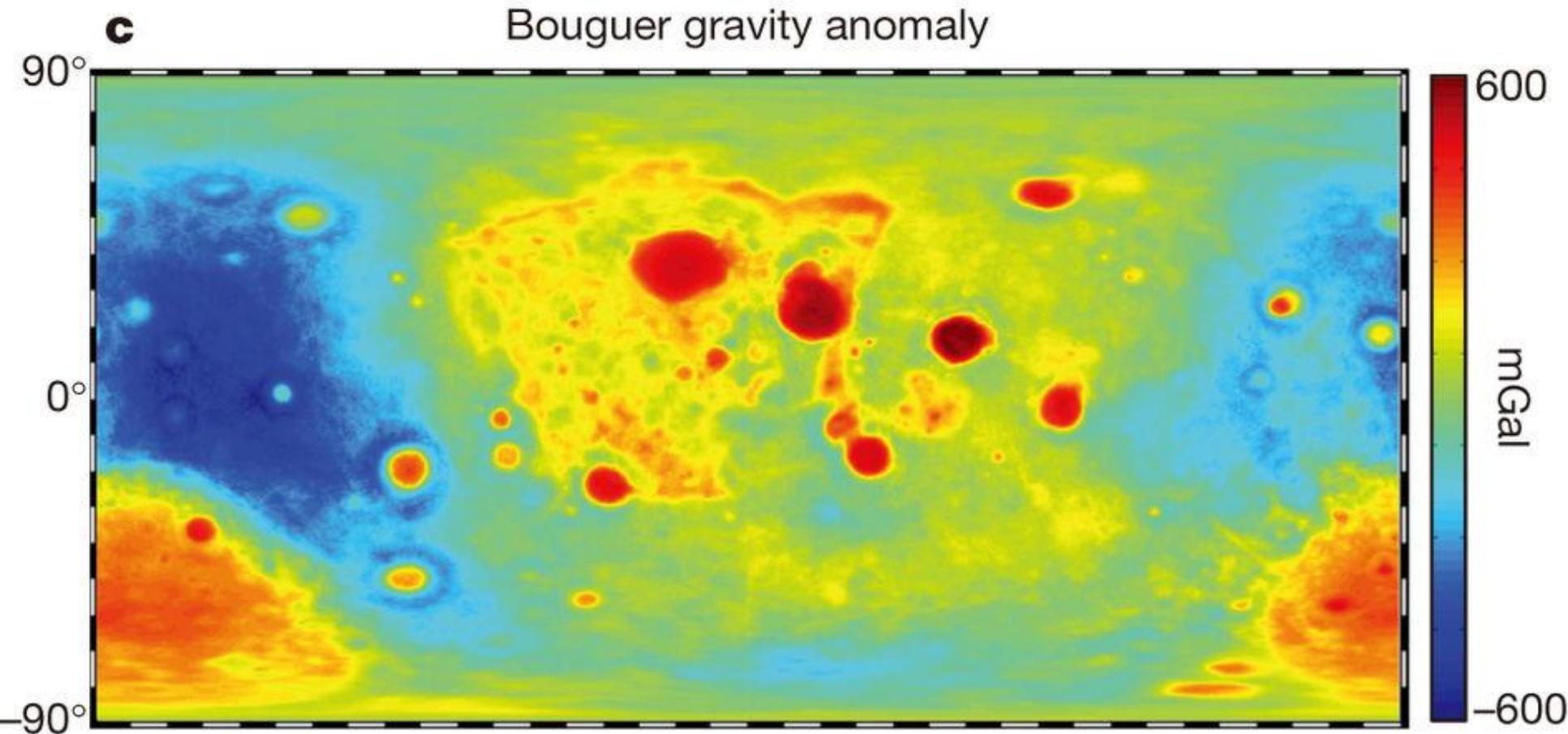
O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA

Dados relacionados ao Mar das Tormentas (*Ocean of Storms*, ou *Oceanus Procellarum*).



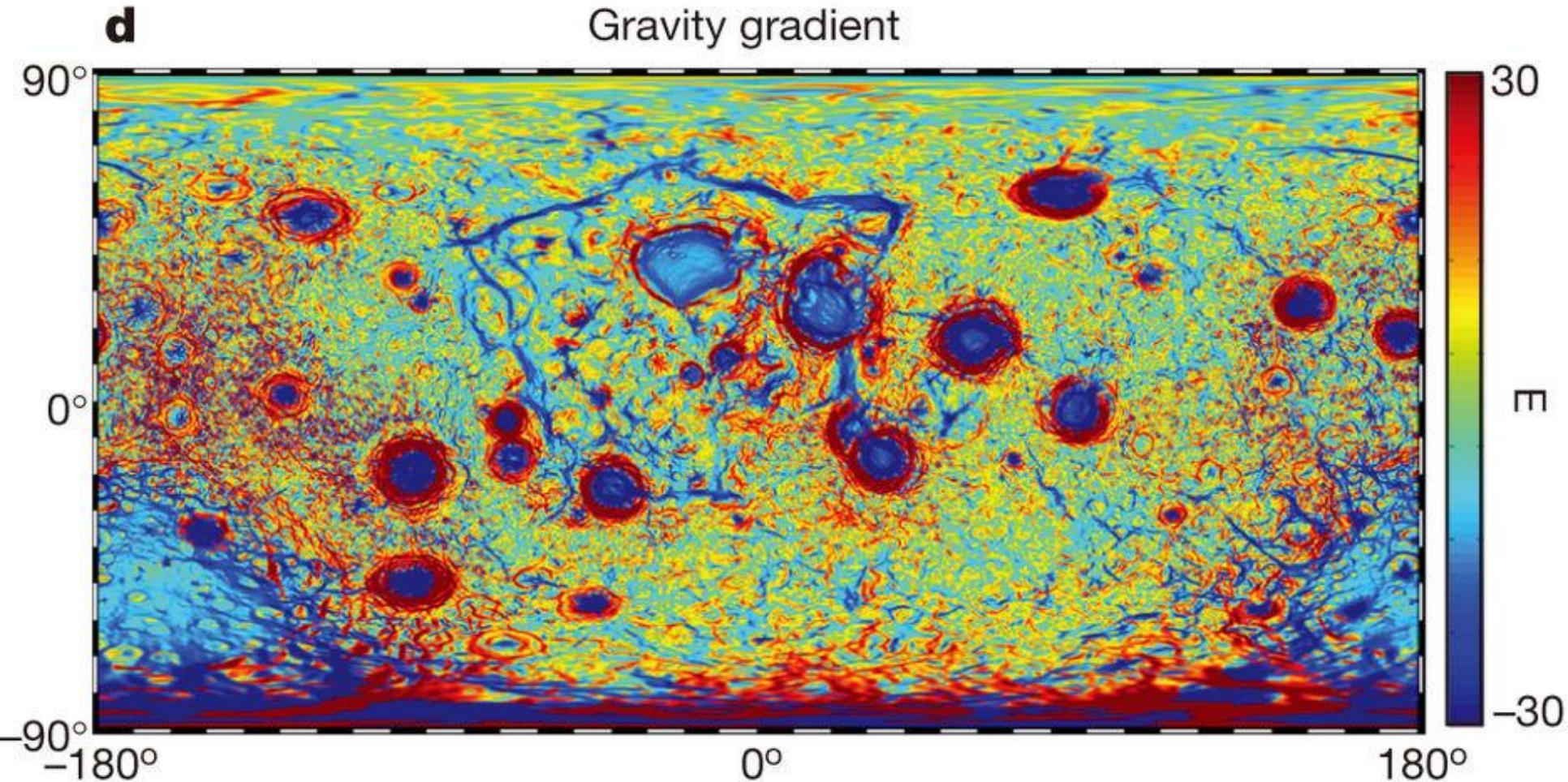
O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA

Dados relacionados ao Mar das Tormentas (*Ocean of Storms*, ou *Oceanus Procellarum*).



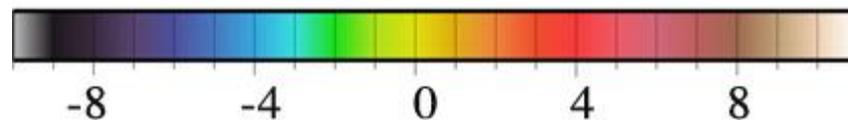
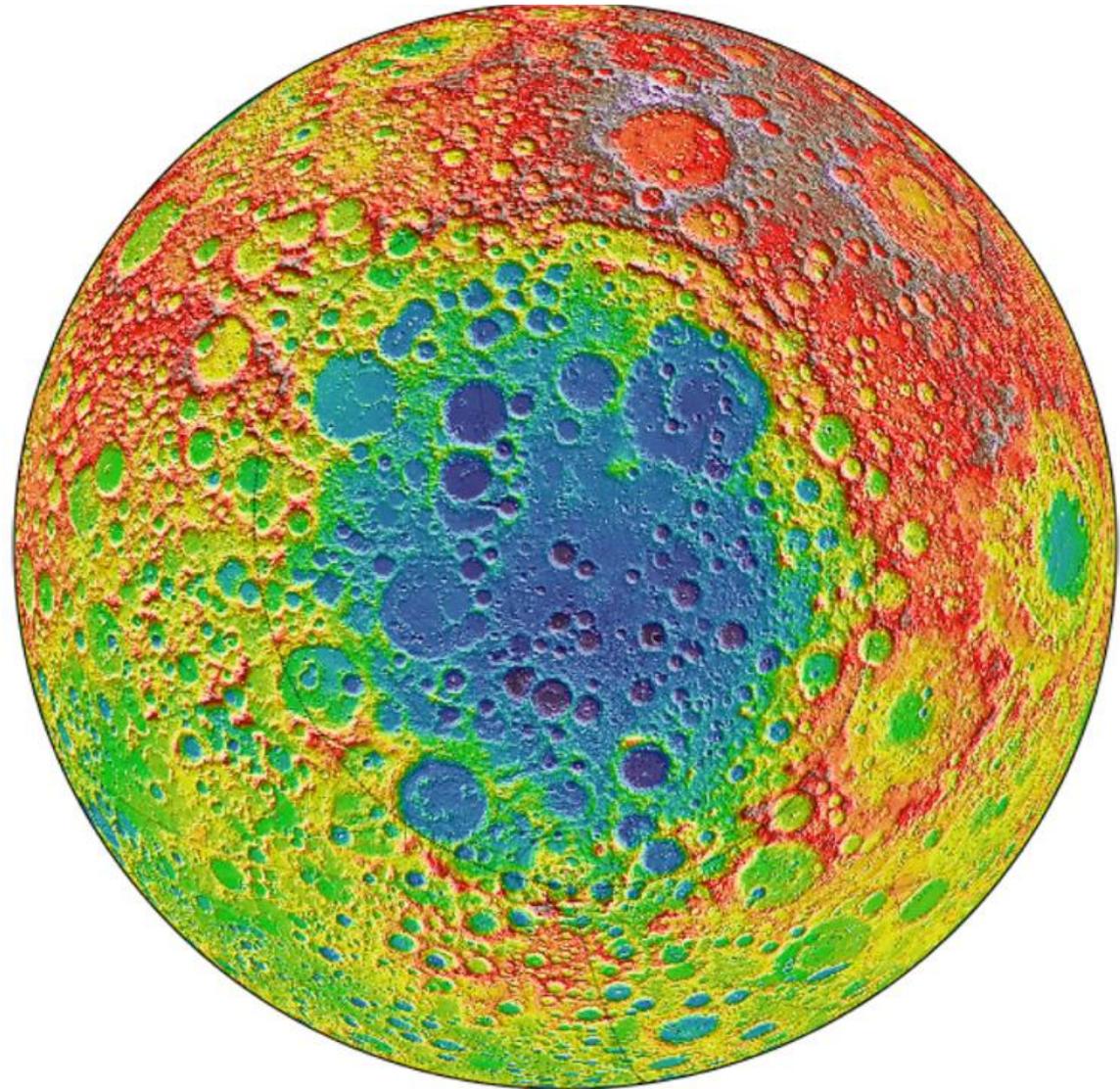
O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA

Dados relacionados ao Mar das Tormentas (*Ocean of Storms*, ou *Oceanus Procellarum*).



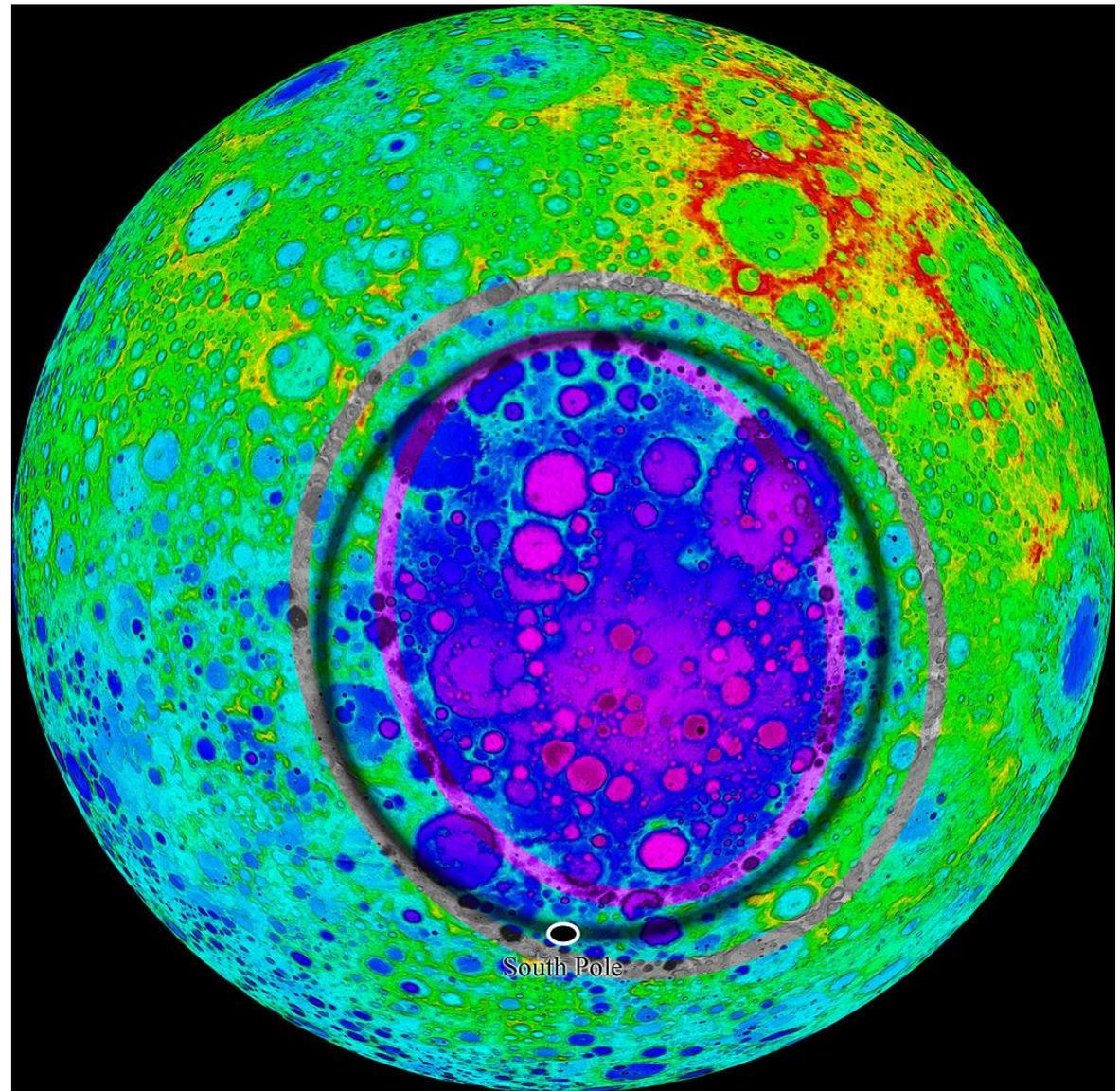
O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA

A bacia
Aitken, com
2600 km de
diâmetro, no
polo sul
lunar.



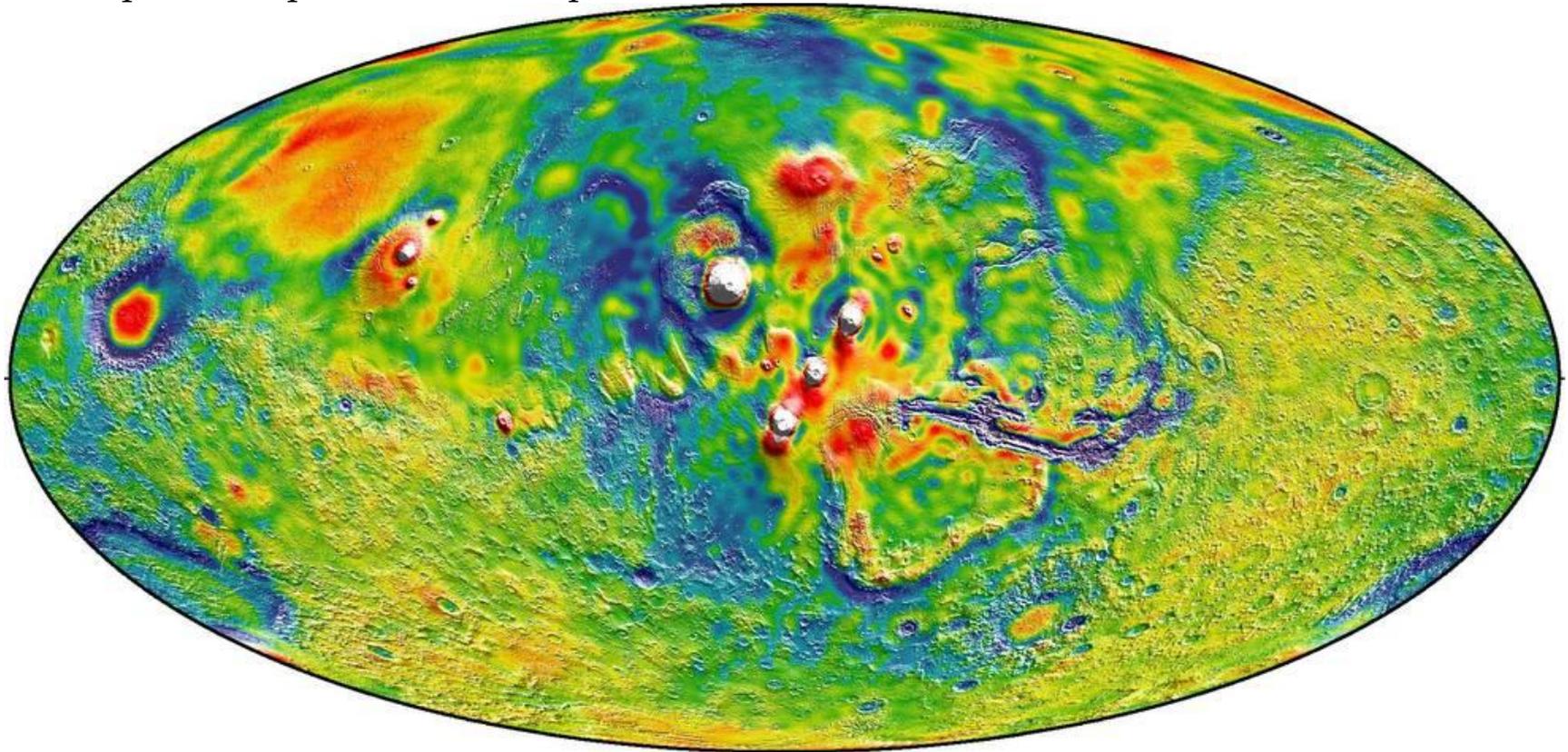
O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA

A bacia
Aitken,
com 2600
km de
diâmetro,
no polo sul
lunar.



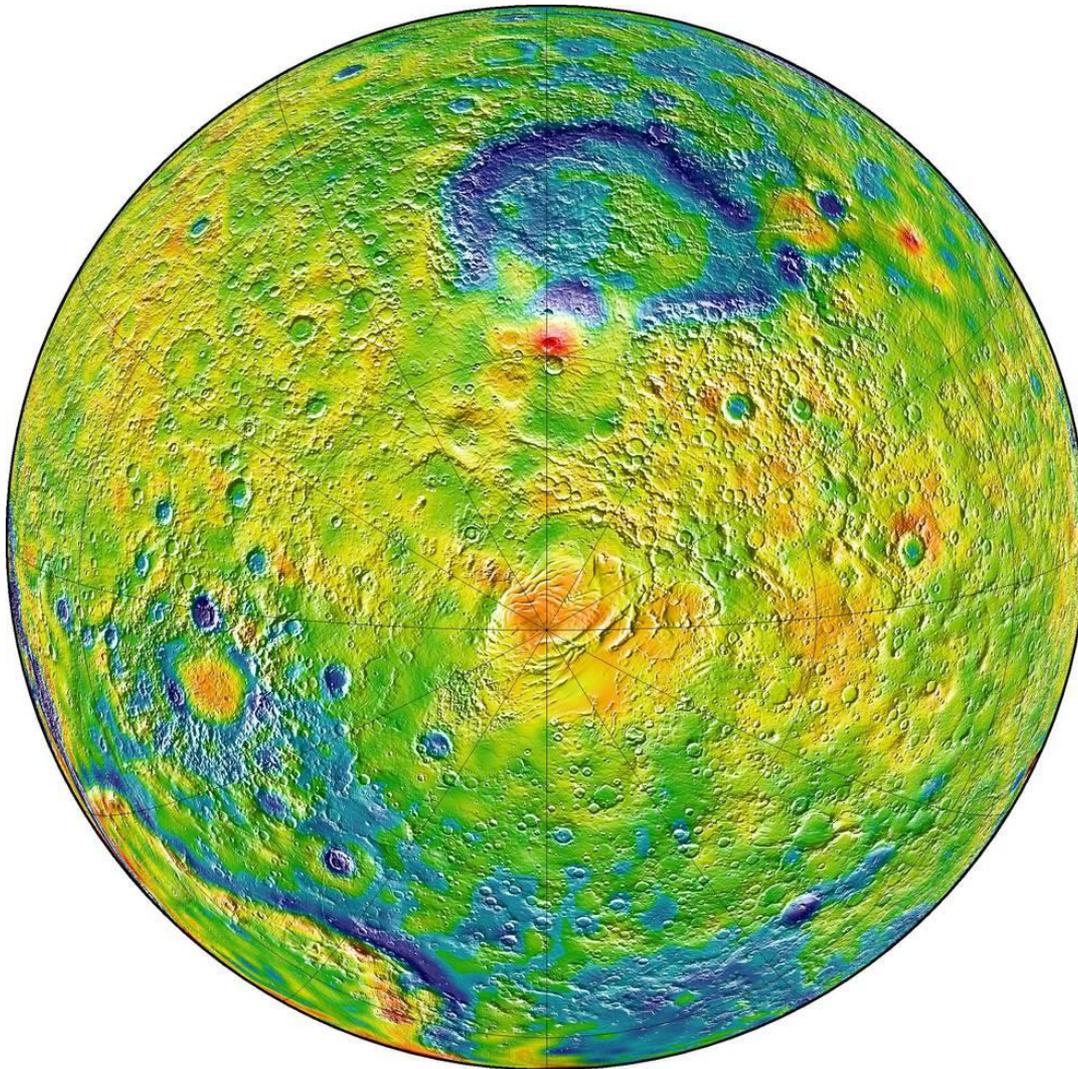
O CAMPO DA GRAVIDADE EM MARTE

A partir de 16 anos de coleta de dados de três espaçonaves que orbitaram o planeta vermelho os cientistas conseguiram elaborar um mapa detalhado do campo de gravidade de Marte. As naves *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey* e *Mars Reconnaissance Orbiter* forneceram informações que permitiram não somente caracterizar o campo de gravidade marciano, o que é extremamente importante para balizar as próximas missões.



Campo de gravidade de Marte, mostrando ao centro os vulcões da região de Tharsis. Cores do branco ao vermelho indicam locais de aceleração da gravidade elevada, ao passo que cores azuis indicam locais onde a aceleração da gravidade é baixa, possivelmente indicando fraturas na parte superficial da litosfera do planeta. Fonte: MIT/UMBC-CRESST/GSFC

O CAMPO DA GRAVIDADE EM MARTE

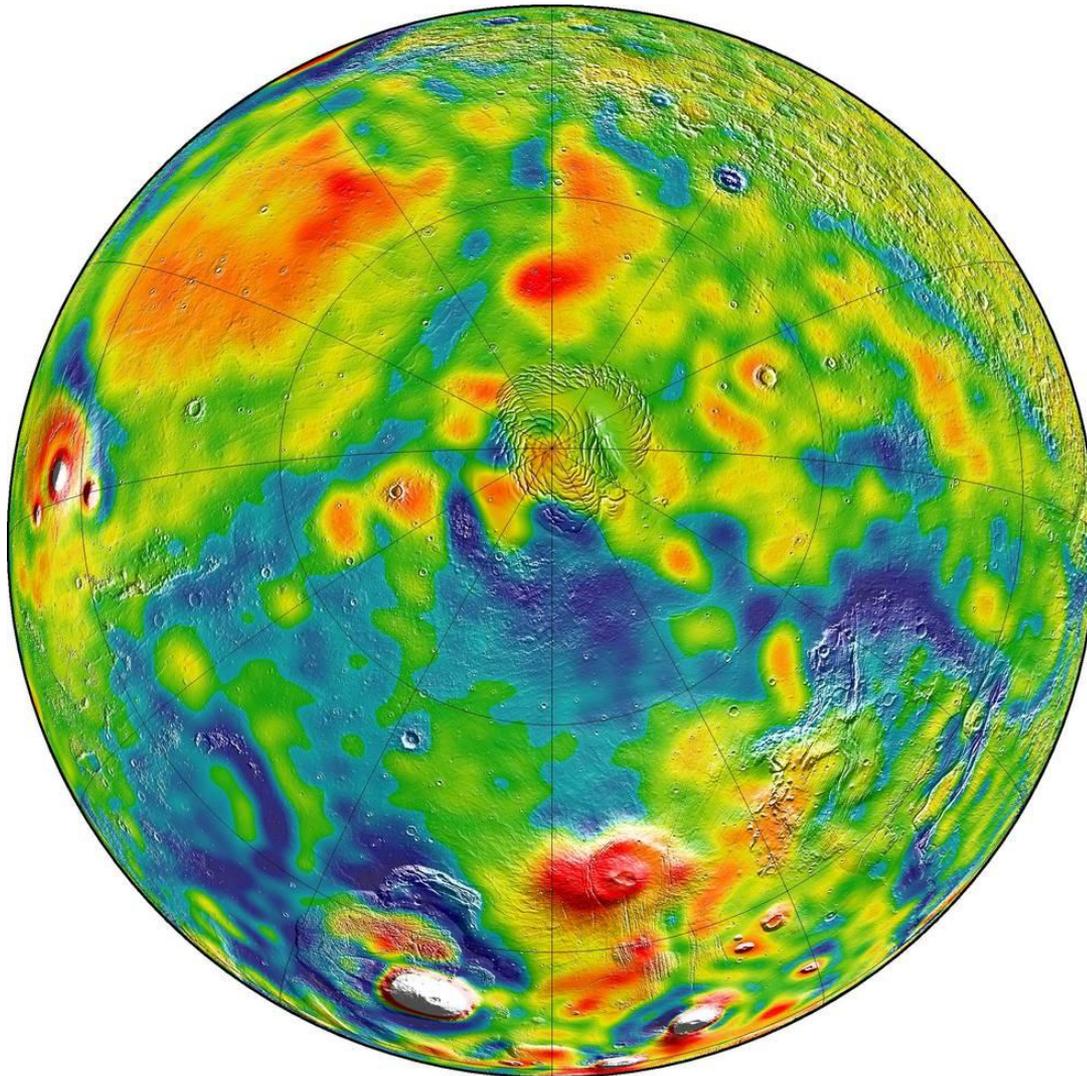


Dentre as descobertas realizadas pela análise destes dados destacam-se os novos mecanismos propostos para a geração das estruturas formadas na fronteira entre os terrenos baixos relativamente suaves presente na porção norte do planeta e as terras altas extremamente crateradas que dominam sua parte sul, e a comprovação da existência de um núcleo externo rochoso fluido.

Campo de gravidade em Marte, olhando a partir do polo Sul, no centro da imagem. Cores do branco ao vermelho indicam locais de aceleração da gravidade elevada, ao passo que cores azuis indicam locais onde a aceleração da gravidade é baixa.

Fonte: MIT/UMBC-CRESST/GSFC

O CAMPO DA GRAVIDADE EM MARTE



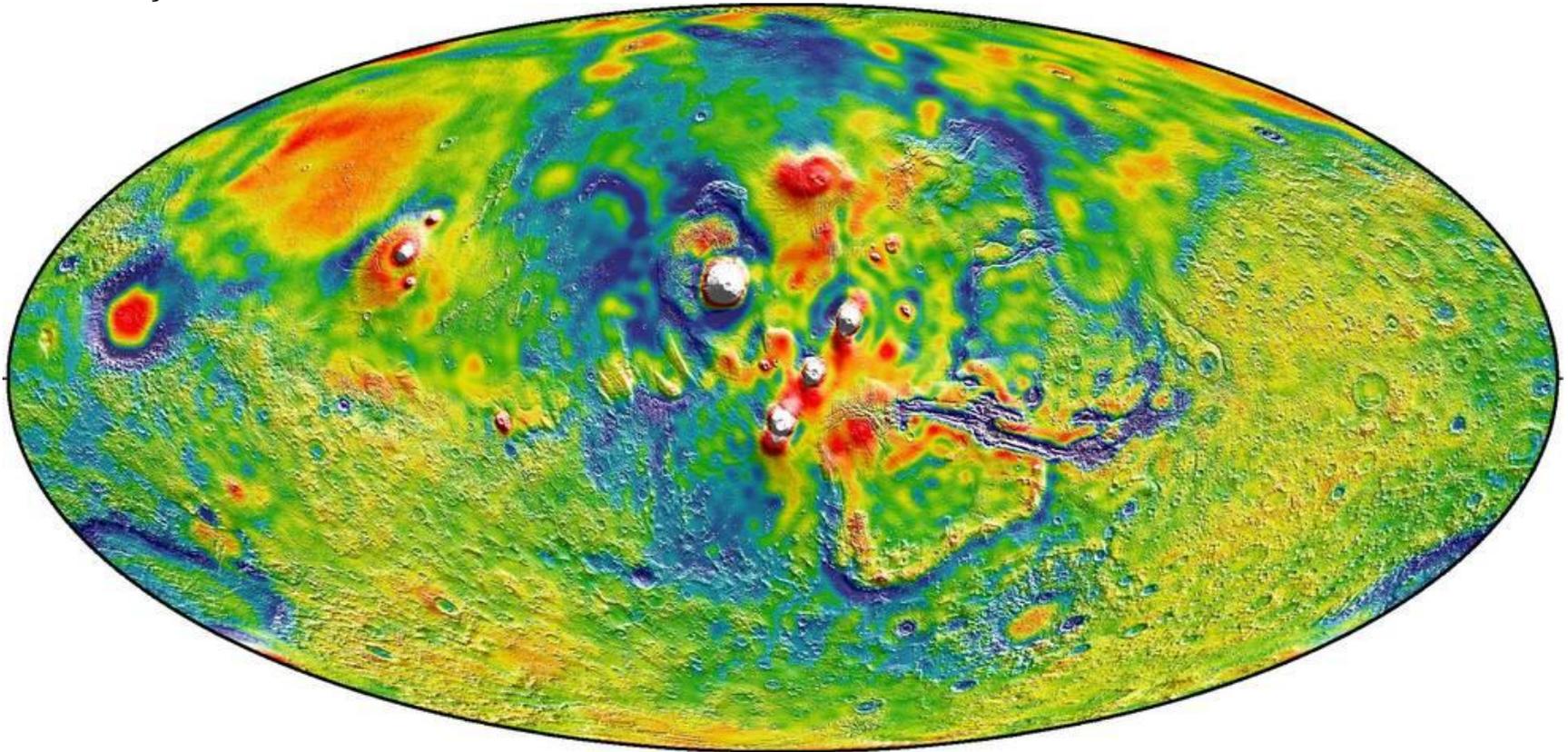
Dentre as descobertas realizadas pela análise destes dados destacam-se os novos mecanismos propostos para a geração das estruturas formadas na fronteira entre os terrenos baixos relativamente suaves presente na porção norte do planeta e as terras altas extremamente crateradas que dominam sua parte sul, e a comprovação da existência de um núcleo externo rochoso fluido.

Campo de gravidade em Marte, olhando a partir do polo Norte, no centro da imagem. Cores do branco ao vermelho indicam locais de aceleração da gravidade elevada, ao passo que cores azuis indicam locais onde a aceleração da gravidade é baixa.

Fonte: MIT/UMBC-CRESST/GSFC

O CAMPO DA GRAVIDADE EM MARTE

Além disso, estudando a variação do campo de gravidade do planeta vermelho por 11 anos, um ciclo de atividade solar completo, foi possível estimar a massa de CO₂ atmosférico que congela na região dos polos por ocasião do inverno marciano entre 3 a 4 trilhões de toneladas (o que corresponde a 12 a 16% da massa de sua atmosfera) e estudar seu movimento entre os polos sul e norte com o decorrer das estações do ano.



Campo de gravidade de Marte, mostrando ao centro os vulcões da região de Tharsis. Cores do branco ao vermelho indicam locais de aceleração da gravidade elevada, ao passo que cores azuis indicam locais onde a aceleração da gravidade é baixa, possivelmente indicando fraturas na parte superficial da litosfera do planeta. Fonte: MIT/UMBC-CRESST/GSFC

IBOOK GRAVIDADE



<https://itunes.apple.com/us/book/gravidade/id926809938?mt=13>



<https://www.dropbox.com/s/mwtgjyjf7u89yds/GRAVIDADE.pdf?dl=0>