

PTR3511 – Navegação por GNSS

# **Modelos do Potencial Gravitacional (Geopotencial)**

## Equação de Laplace em coordenadas esféricas

$$r^2 \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + 2r \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \cot \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} = 0$$

A solução será dada pela série:

$$V(r, \theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} Y_{nm}^c + B_{nm} Y_{nm}^s)$$

$$Y_{nm}^c = P_{nm}(\cos \theta) \cos m\lambda$$

$$Y_{nm}^s = P_{nm}(\cos \theta) \sin m\lambda$$

Usando coeficientes sem unidade, plenamente normalizados:

$$V(r, \theta, \lambda) = \frac{KM}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n [\bar{J}_{nm} \bar{Y}_{nm}^c + \bar{K}_{nm} \bar{Y}_{nm}^s] \right\}$$

Os coeficientes  $A_{nm}$ ,  $B_{nm}$  com unidades de potencial

os coeficientes  $J_{nm}$ ,  $K_{nm}$  sem unidades

os coeficientes plenamente normalizados  $\bar{J}_{nm}$ ,  $\bar{K}_{nm}$

Se vinculam através das expressões:

$$A_{nm} = -\frac{KM}{a} J_{nm} \quad B_{nm} = -\frac{KM}{a} K_{nm}$$

$$\bar{J}_{no} = \frac{1}{\sqrt{(2n+1)}} J_{no} \quad (M = 0)$$

$$\bar{J}_{nm} = \sqrt{\frac{(n-m)!}{2(2n+1)(n-m)!}} J_{nm}$$

$$\bar{K}_{nm} = \sqrt{\frac{(n-m)!}{2(2n+1)(n-m)!}} K_{nm}$$

# Era Espacial

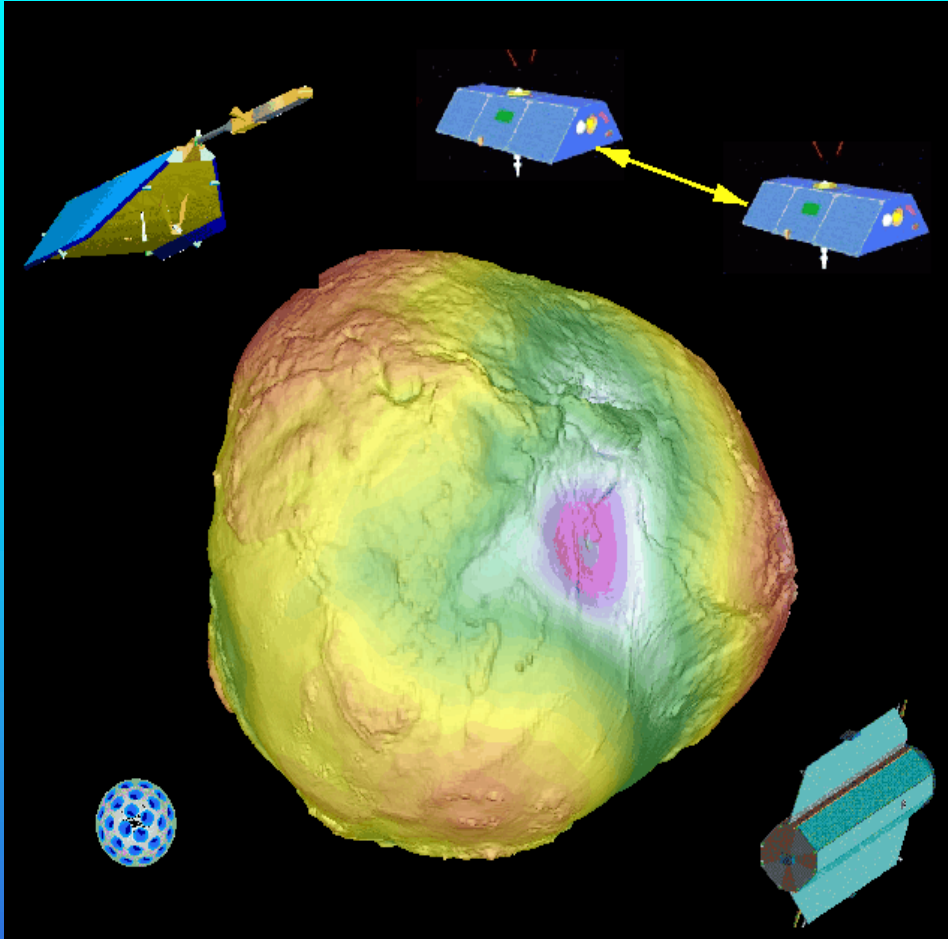


Figura obtida junto ao GFZ

- Foi responsável por inúmeras mudanças na geodésia e em outras ciências. Entre elas, a melhoria do conhecimento do campo gravitacional e, em consequência, da forma da Terra.

# Missões modernas

- CHAMP – lançado em 15 de julho de 2000
- GRACE – lançado em 17 março de 2002
- GOCE – lançado em 19 de março de 2009

# Missões modernas

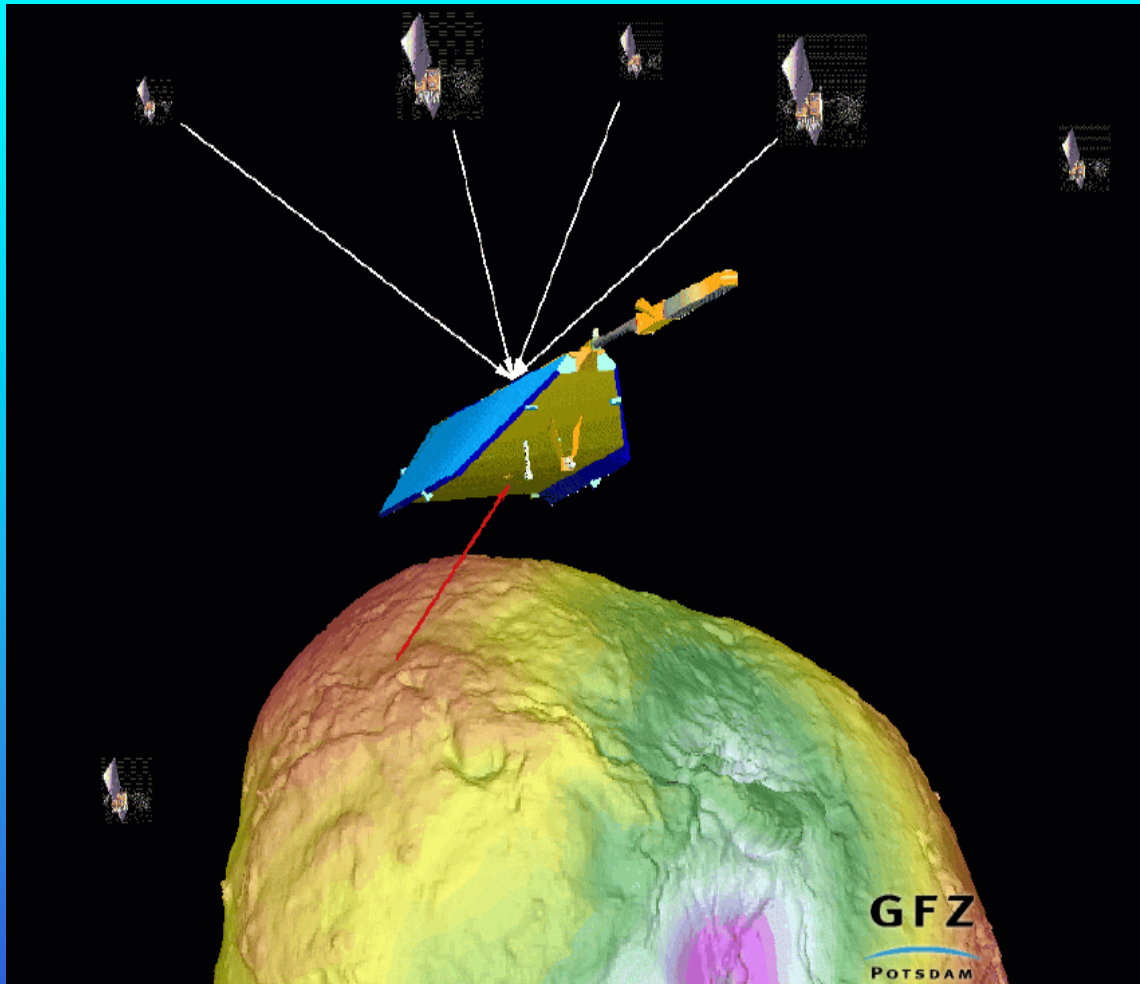
- Um dos grandes problemas na modelagem do campo gravitacional a partir dos satélites é que a força do campo diminui com a altitude. Portanto, o raio da órbita deve ser o menor possível para que o sinal devido ao campo seja o mais forte. Além disso, o ambiente do satélite deve ser calmo e idealmente livre de efeitos não gravitacionais. Os satélites das missões modernas, cada um com sua característica, procura atender a estas exigências.

# Resumo da Características principais das missões de satélites CHAMP, GRACE e GOCE

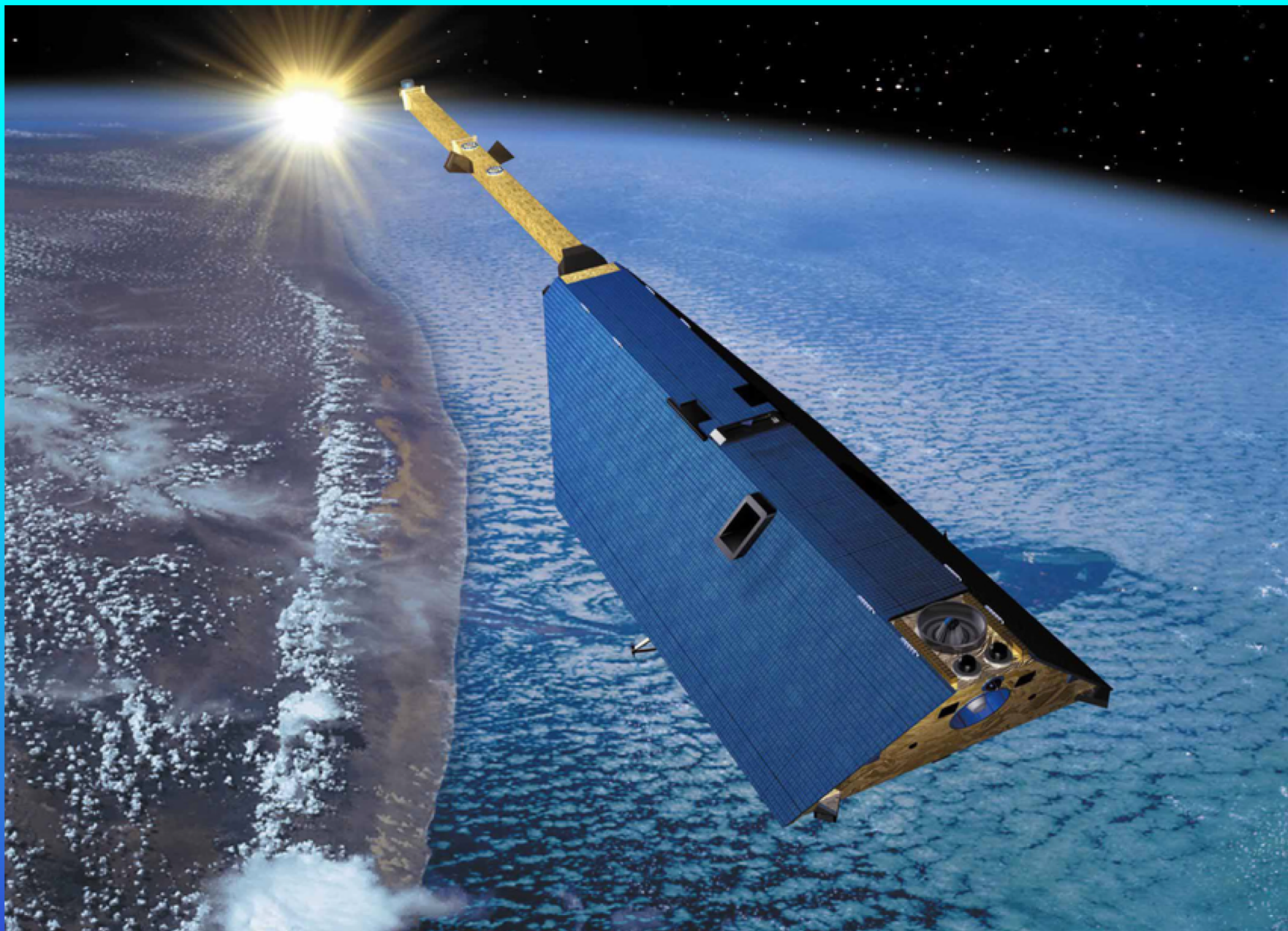
Missão	Lançamento	Tempo de vida	Altura da órbita	Inclinação da órbita	Principais instrumentos	Objetivo da missão
<b>CHAMP</b>	15/07/2000	5 anos	454 km	87,2°	GPS, acelerômetros (livre de atrito) e magnetômetros	Gravidade, campo magnético e atmosfera
<b>GRACE</b>	17/03/2002	5 anos	485 km	89°	Sistema de microondas banda K, GPS e acelerômetro	Gravidade
<b>GOCE</b>	17/03/2009	2 anos	250 km	96,5°	GPS e gradiômetro tri-axial	Oceanografia e Gravidade



# A missão **CHAMP** (**CH**allenging **M**inisatellite **P**ayload)



- Primeiro satélite das três missões modernas.
- Dimensões:
- Altura: 1m
- Largura: 1,6 m
- Comprim.: 4 m
- Peso: 500 kg
- Altitude: 470 km

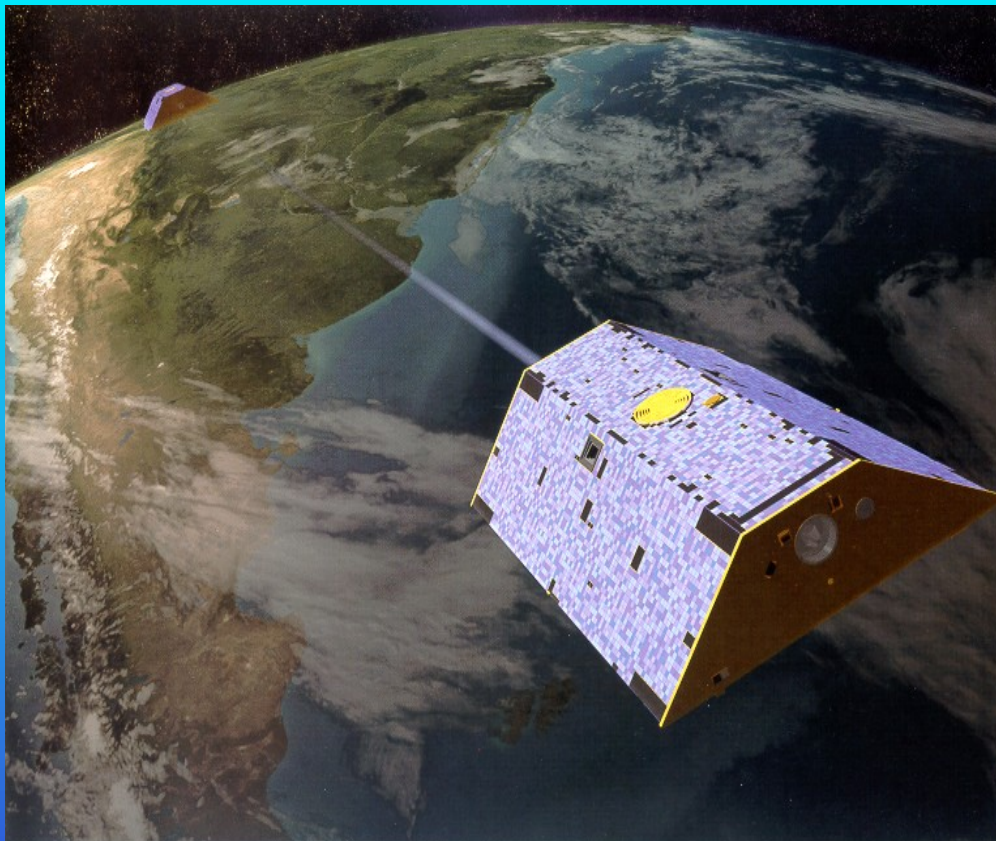


# A missão **CHAMP** (**Challenging Minisatellite Payload**)

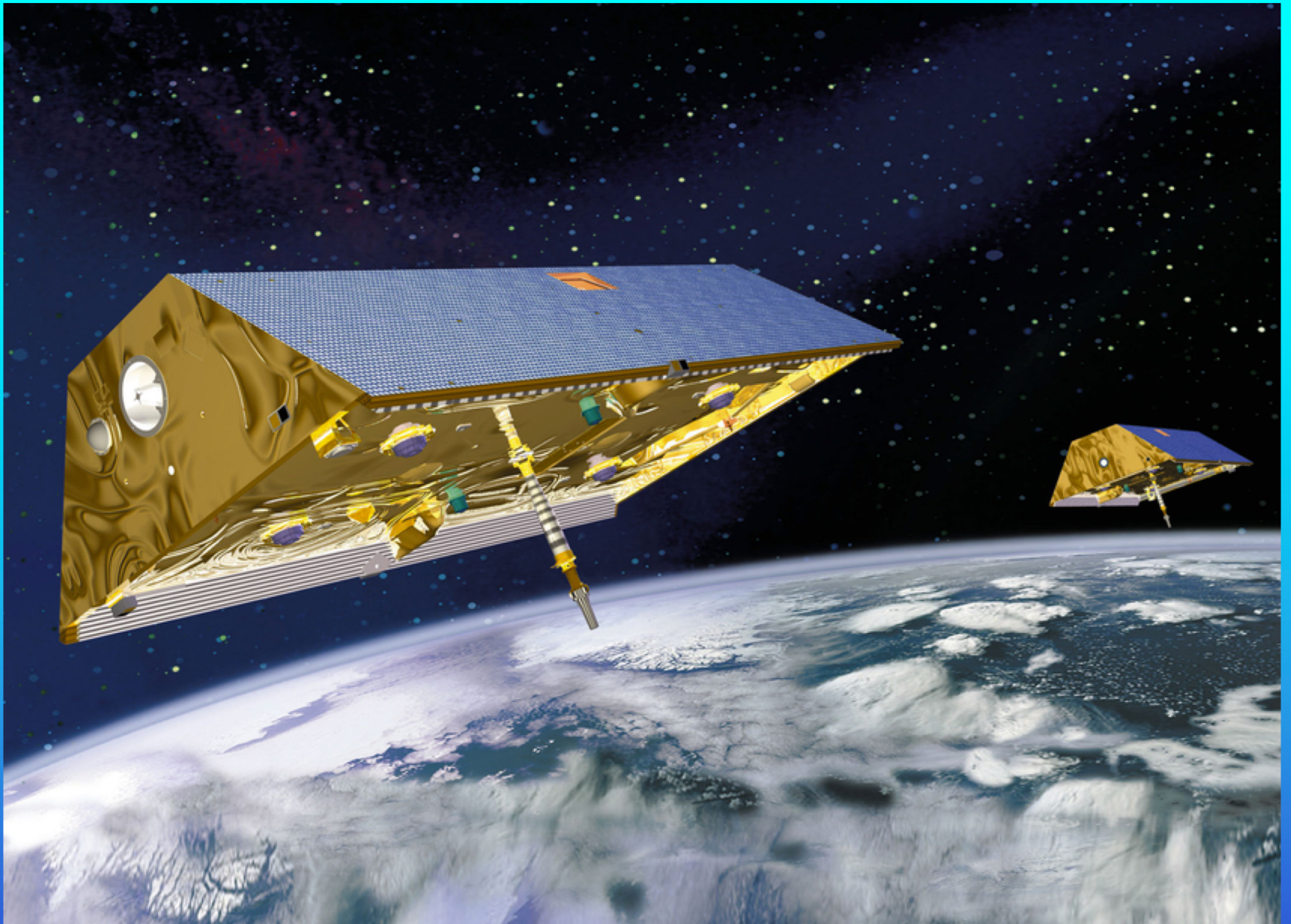
- **Objetivos**
  - Estudo do campo gravitacional da Terra.
  - Estudo do campo magnético e suas variações no tempo
    - Receptor GPS a bordo realiza medidas de fase e da distância a cada 10s. Acelerômetro tri-axial.
    - Modelo do geopotencial: EIGEN-1S e 2S (**E**uropean **I**mproved **G**ravity Model of the **E**arth by **N**ew **T**echniques)

# GRACE

## (Gravity Recovery And Climate Experiment)

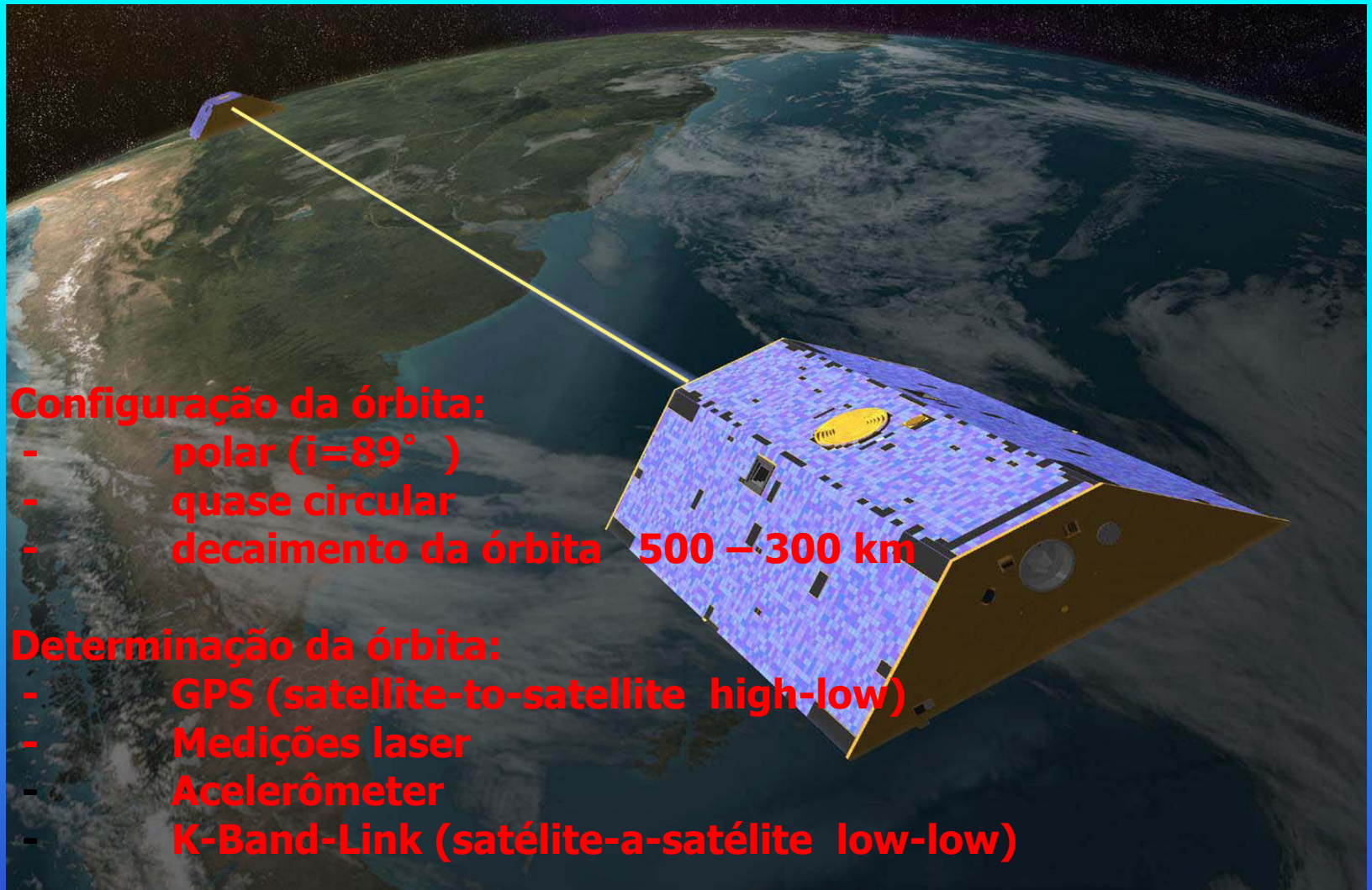


- Objetivos:
- Estudo do campo gravitacional da Terra e suas variações no tempo
  - Monitoramento de águas na superfície e no sub-solo, mudanças nas camadas de gelo e no nível do mar, correntes superficiais e profundas nos oceanos, variações da Terra sólida.
  - Geóide: precisão de 1 cm, com resolução de 200 km
  - É preciso distinguir o erro de comissão em relação ao erro de omissão



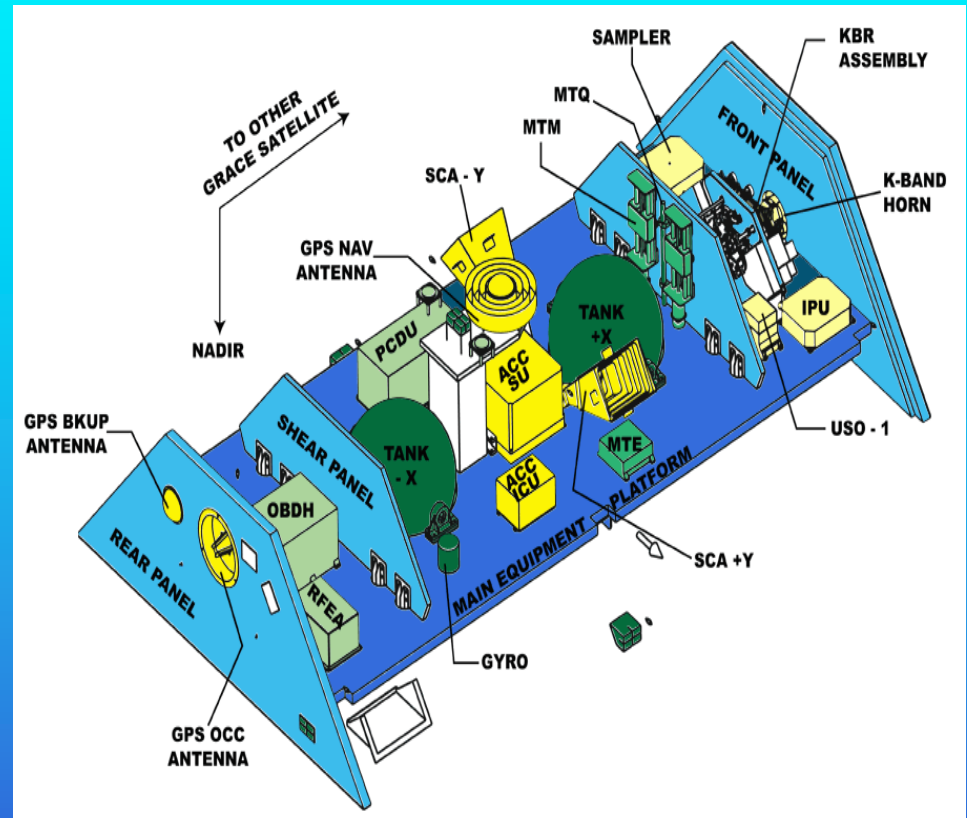
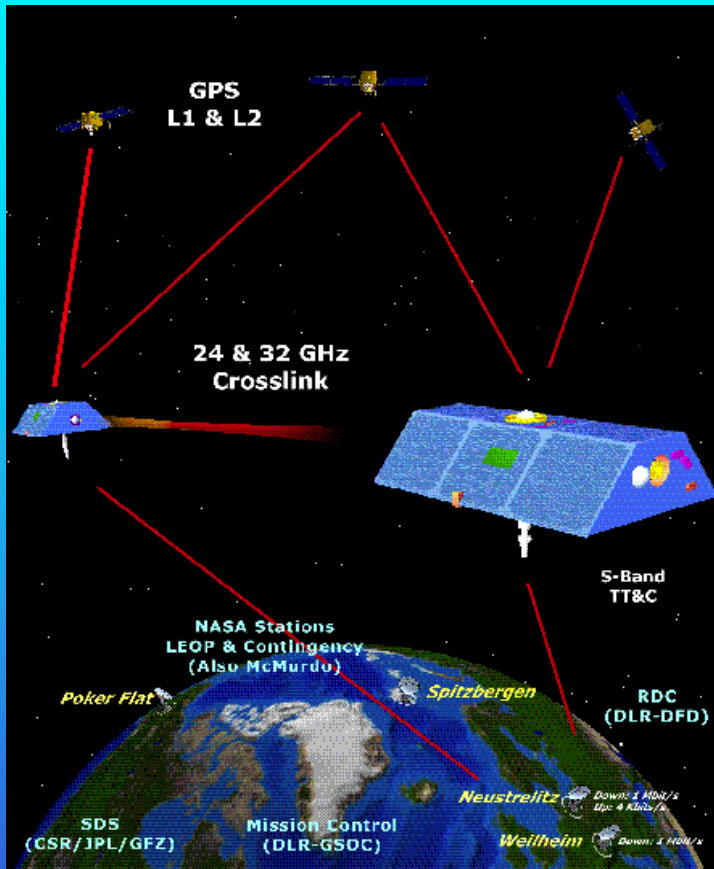
# Satélite GRACE

(Cooperação USA/Alemanha)



# GRACE

## (Gravity Recovery And Climate Experiment)



# GRACE

- Lançado ao espaço em 17 de março de 2002 (9:21 UTC)
- Permitirá melhorar o estudo dos perfis de pressão, temperatura e umidade da atmosfera.
- Satélites gêmeos em órbita polar, com altura de 550 km, separados um do outro de 220 km.
- Dotado de GPS, DORIS e LASER e sistema de microondas (24 e 32 GHz) para medir a distância entre eles com precisão de 10  $\mu\text{m}$ .

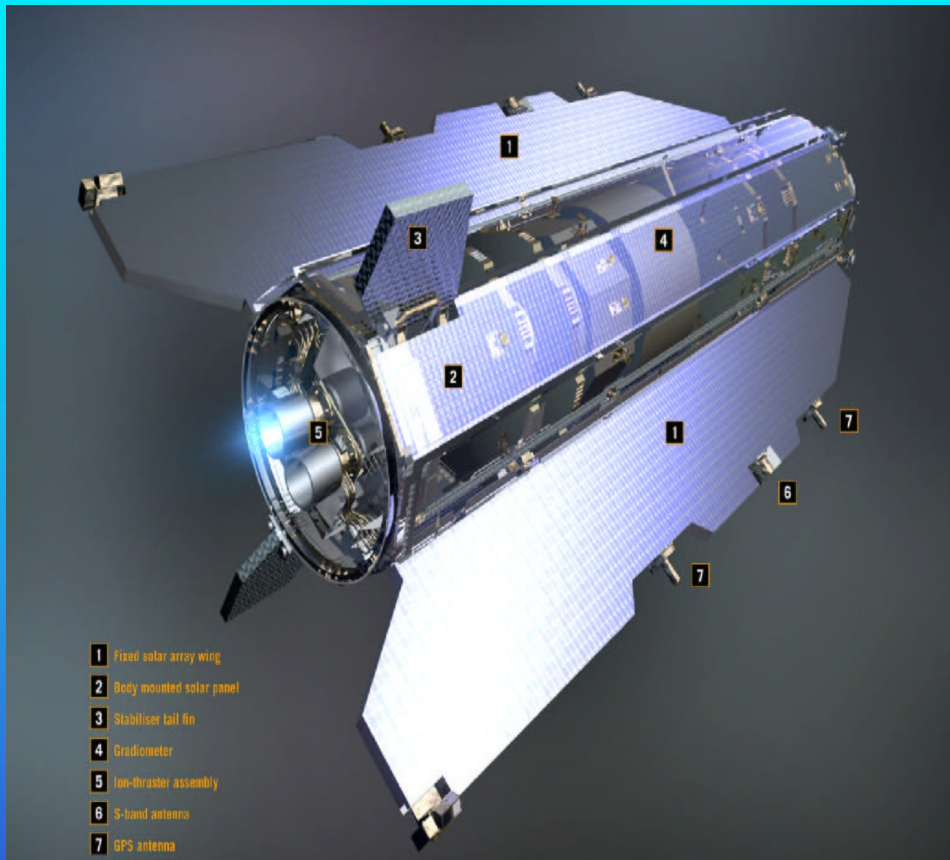


# GRACE

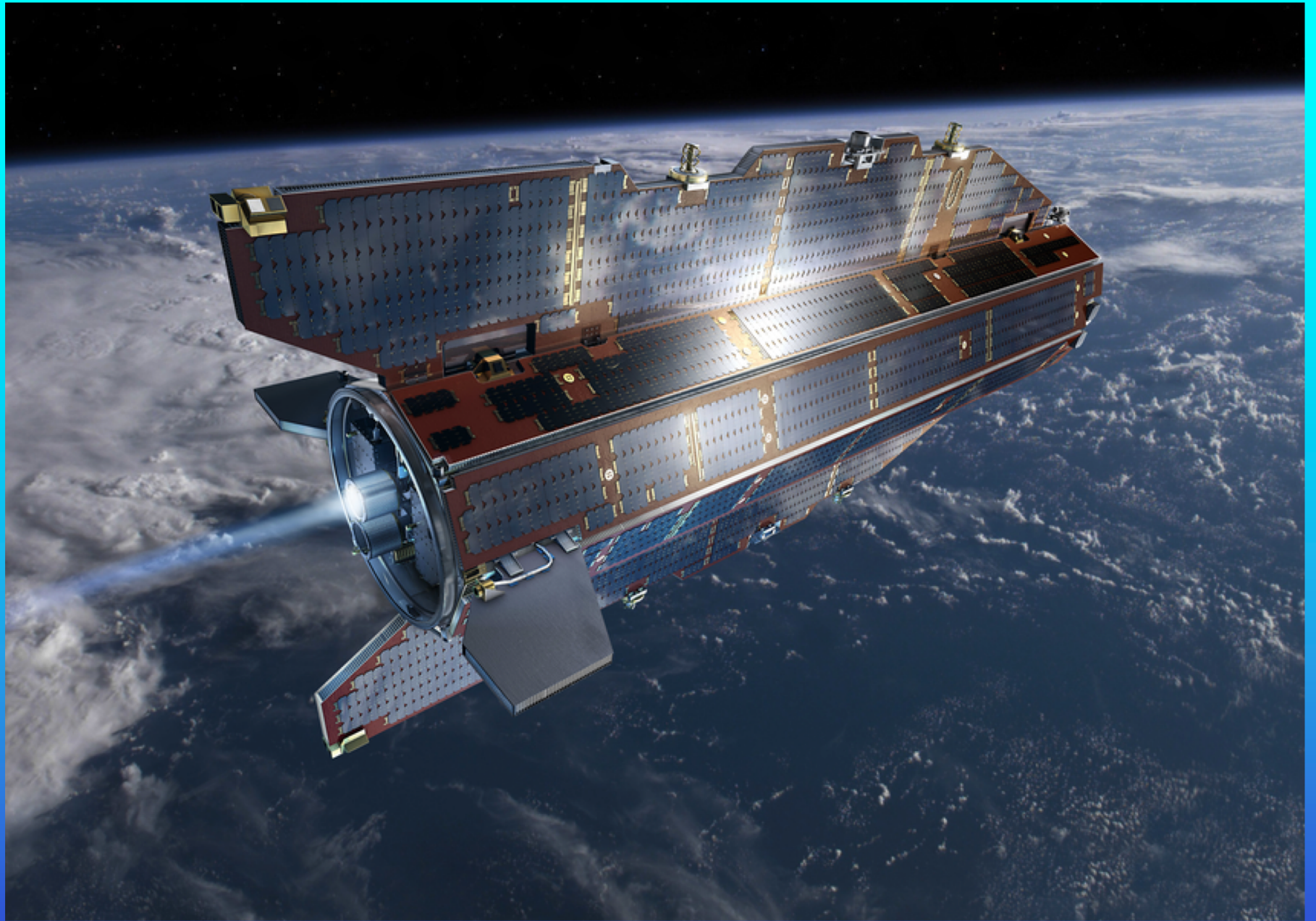
- Em função do fato de que, quando um dos satélites entra numa região de influência de uma certa massa ou outro ainda permanece fora da influência, é possível determinar a variação de massa. Por exemplo, o satélite tem sido usado na Amazônia para monitorar as variações do nível da água.

# GOCE

(Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer)



- O principal objetivo da missão é a determinação precisa, com alta resolução e acurácia, do campo gravitacional global estático da Terra. Para isto o satélite dispõe de um sofisticado sistema para eliminar o atrito com a atmosfera. Ou seja, o satélite orbita numa condição de ‘queda livre’.



# GOCE

- Lançado no dia 17 de março de 2009, 14:21 TUC, na base Russa de Plesetsk.
- O satélite é coordenado pela ESA (Agência Espacial Europeia). A vida útil prevista inicialmente foi de 20 meses.
- Livre de atrito. Para medir o campo gravitacional o satélite precisa de alguma forma permanecer em “queda livre”. Para tanto, o GOCE tem uma aerodinâmica quase perfeita e um dispositivo de compensação instantânea do atrito. Trata-se de um sofisticado sistema de propulsão ionizada que compensa o atrito e que está montado na parte traseira do satélite. O sistema utiliza um xenon eletricamente carregado para criar um leve impulso; ele gera continuamente forças mínimas de 1 a 20 milinewtons (mN) dependendo do atrito que o satélite experimenta.

# GOCE

- O satélite foi lançado a uma altura de 283 km iniciando um processo de queda livre a uma razão de 150 a 200 m por dia, até que atingisse a altura de 273 km quando o sistema 'livre de atrito' começou a funcionar.
- O coração do satélite é o denominado *Electrostatic Gravity Gradiometer* (EEG) constituído de 3 pares de acelerômetros capacitivos dispostos ortogonalmente em 3 eixos com uma distância de 50cm entre cada par. A diferença nas acelerações de cada par é o produto científico básico do gradiômetro. Em um período de 200 segundos a estrutura do eixo deve ser estável ao nível do diâmetro de um átomo visando a necessária sensibilidade.

# GOCE

- A metade da soma das acelerações obtida a partir dos acelerômetros de um eixo corresponde a forças não gravitacionais externas. Esta informação é usada para contrapor continuamente o atrito com a atmosfera através de um sistema de propulsão elétrica. Ou seja, o GOCE se desloca livre de atrito com a atmosfera ao longo da direção do vôo.

# GOCE

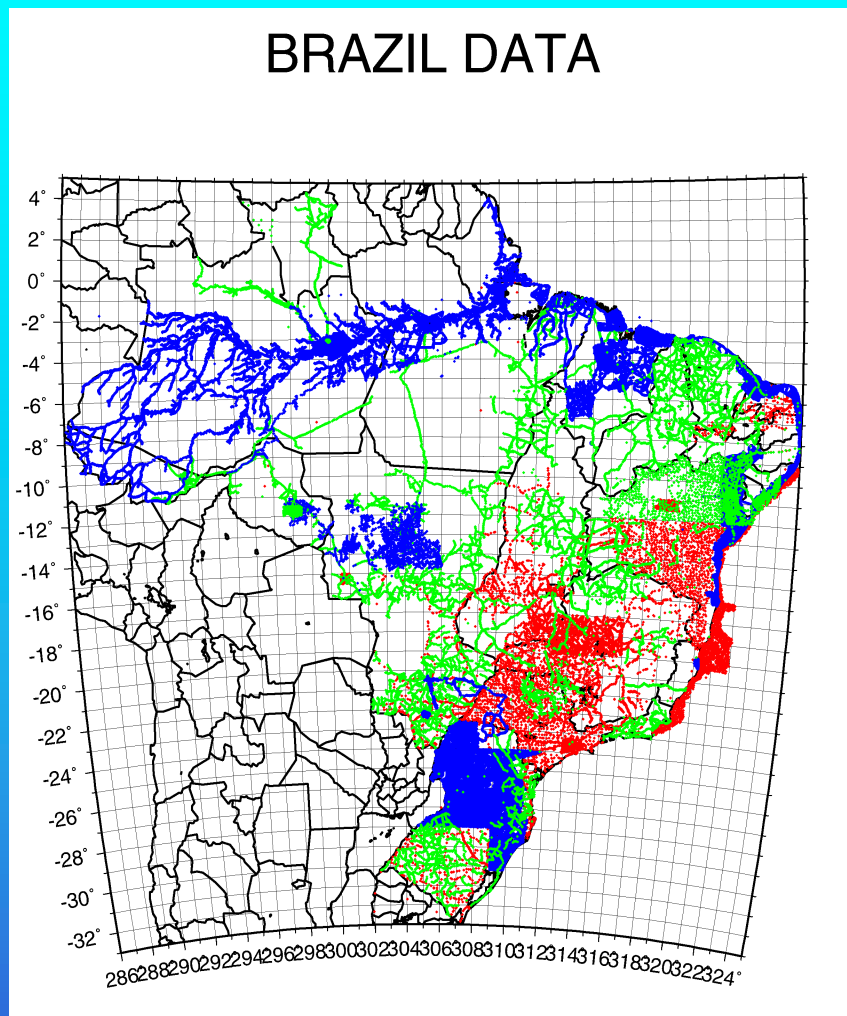
- Embora o acelerômetro seja muito sensível, não pode modelar todas as componentes do campo gravitacional nas diferentes escalas com qualidade. Assim, complementando o gradiômetro, o satélite tem um sofisticado sistema de observação aos satélites GPS. Com isto as variações dos elementos orbitais são rigorosamente monitorados e os longos comprimentos de onda do campo determinados. O gradiômetro determina as componentes mais curtas de onda do campo.

# GOCE

- META: Determinação do geóide com precisão de 1 cm e resolução de 80 km.
- Altitude do satélite de 240 km.
- É um satélite livre de atrito mediante correção do efeito do mesmo a partir dos acelerômetros. Para isso o veículo tem um motor.
- A vida útil prevista é de 2 anos.
  
- Gradiômetro da gravidade
- GPS/GLONASS
- Satellite-to-Satellite Tracking (SST)
- Controle livre de atrito.

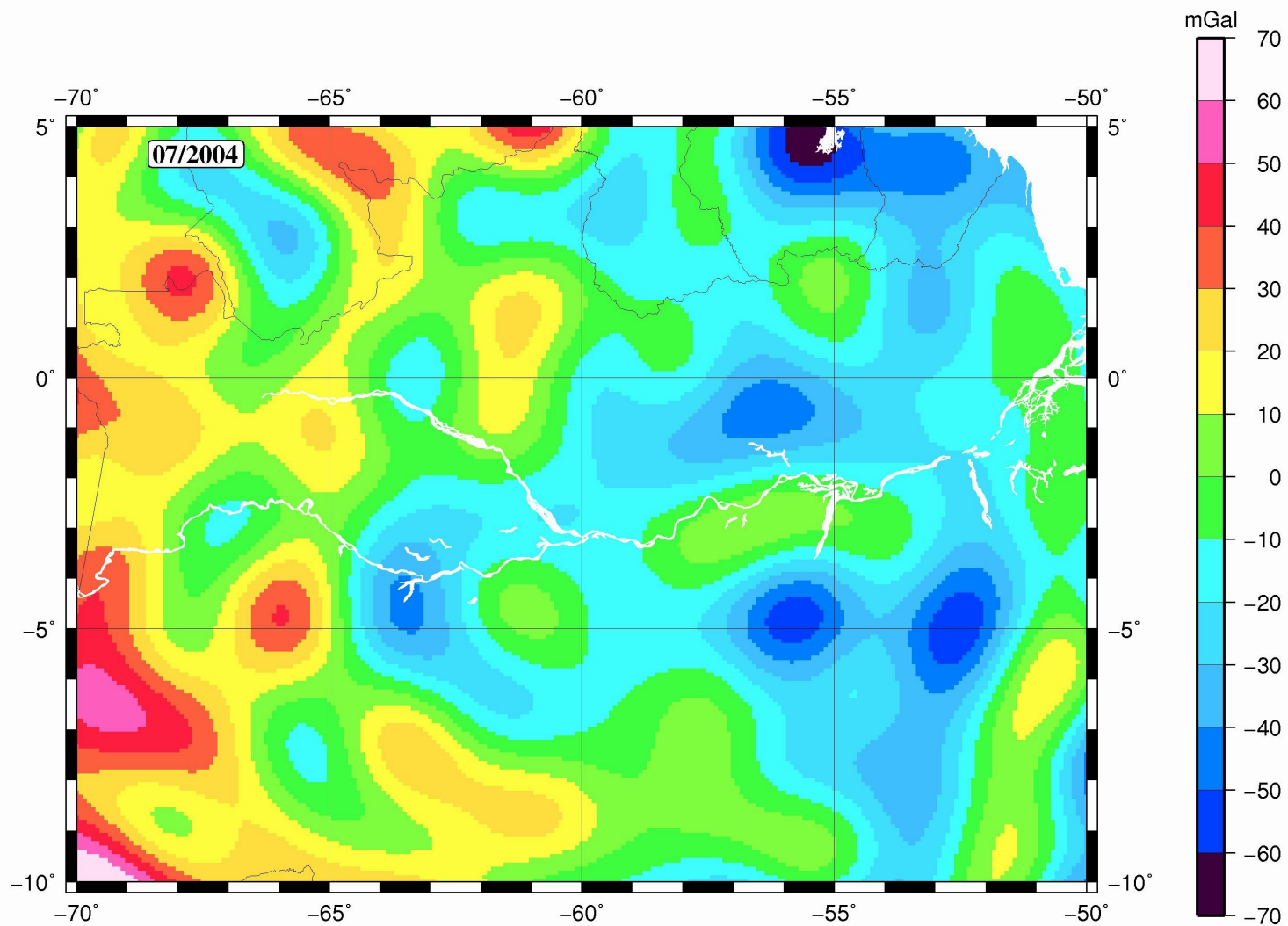


# Gravimetria



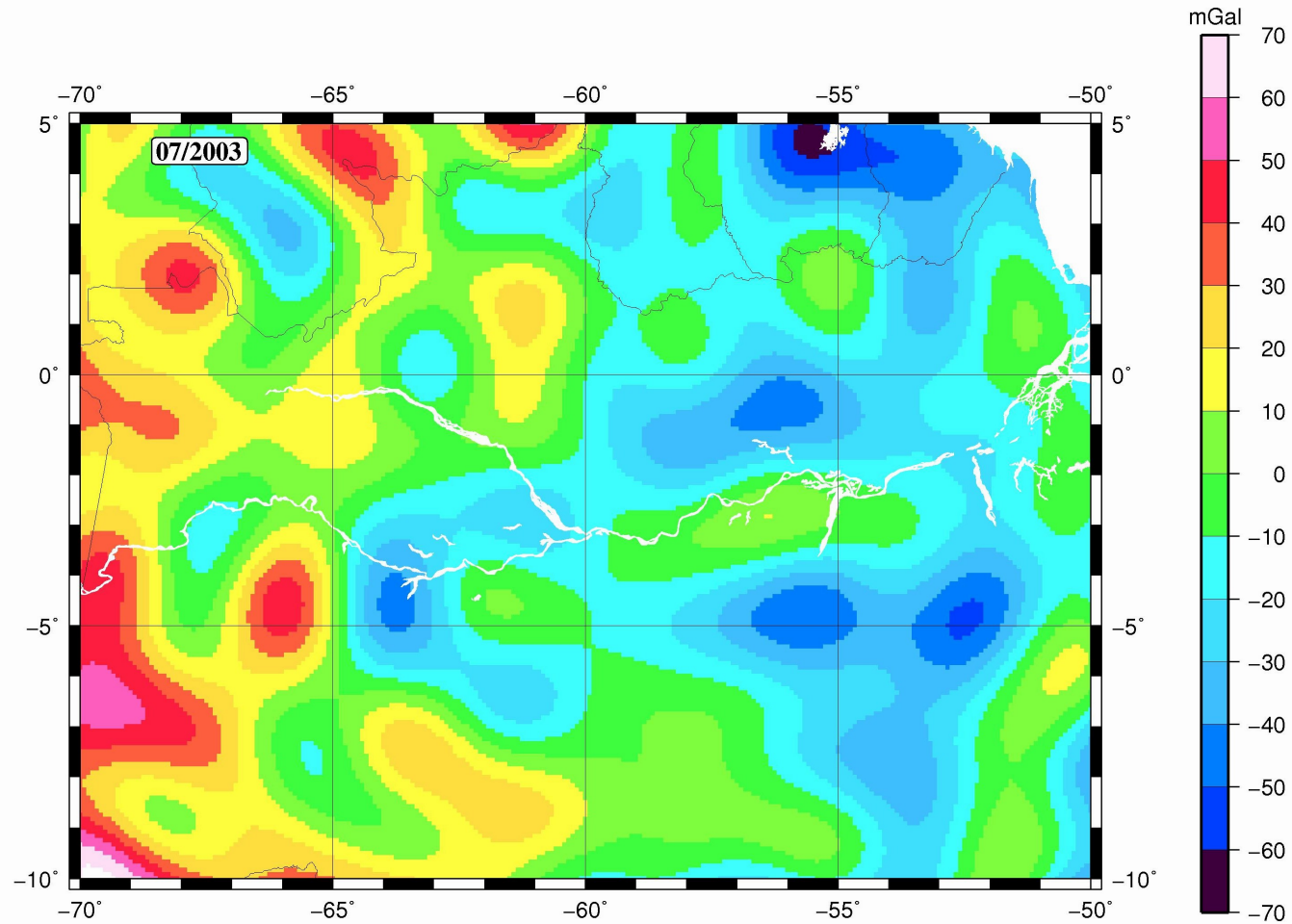
- O número total de estações disponíveis no Brasil:
- 472.535

# Modelos Mensais obtidos com o GRACE



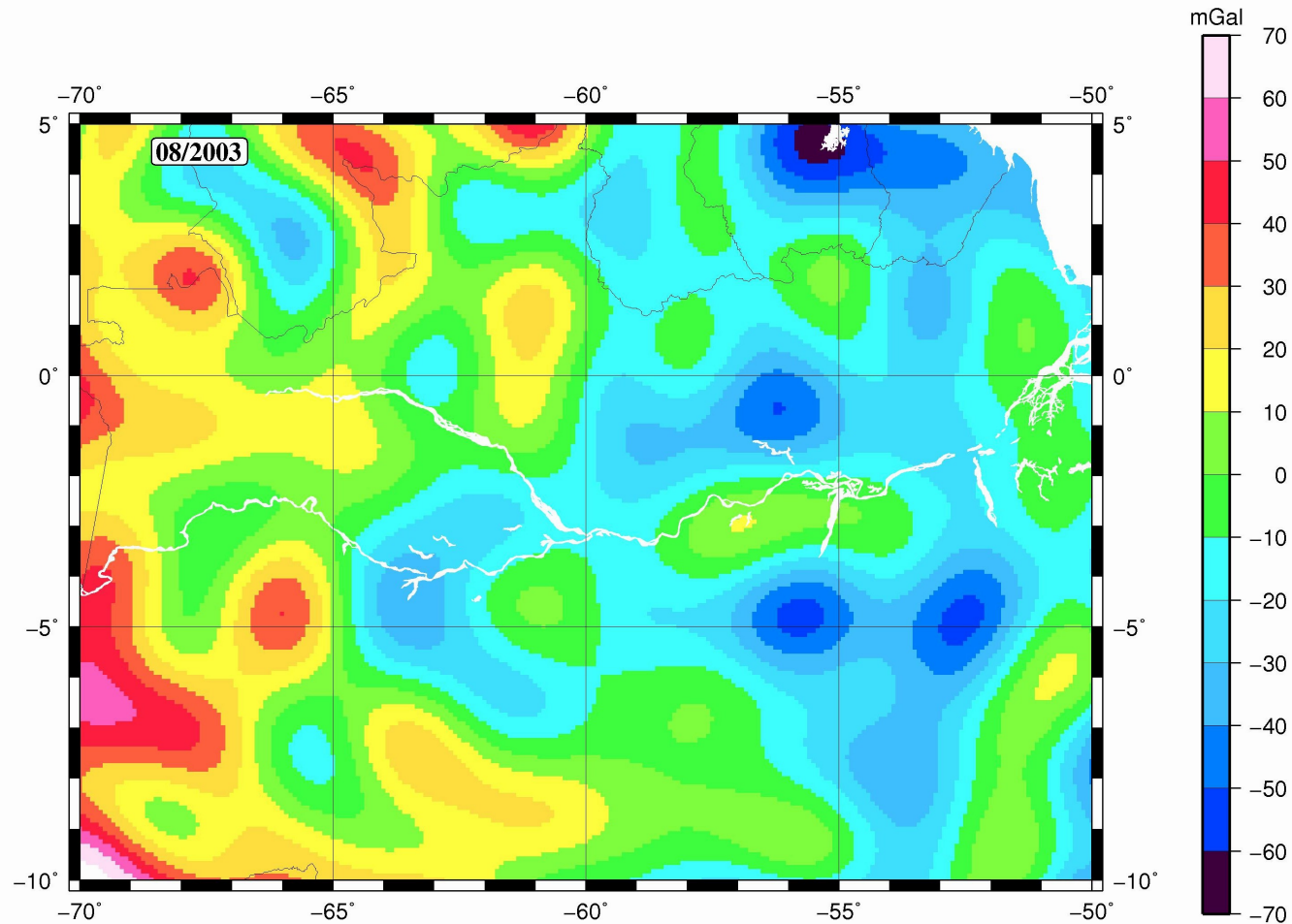
# Julho

# 2003

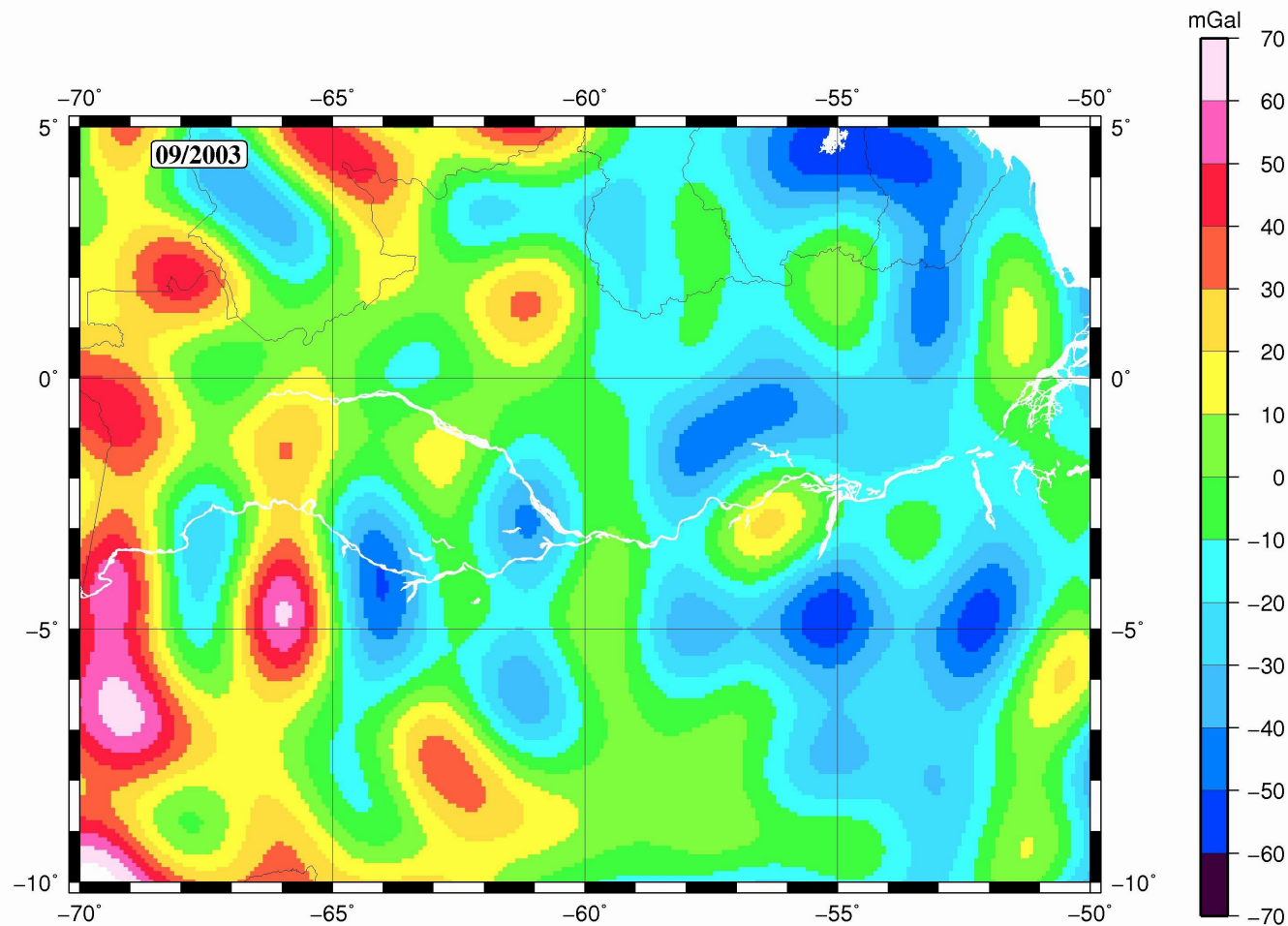


# Agosto

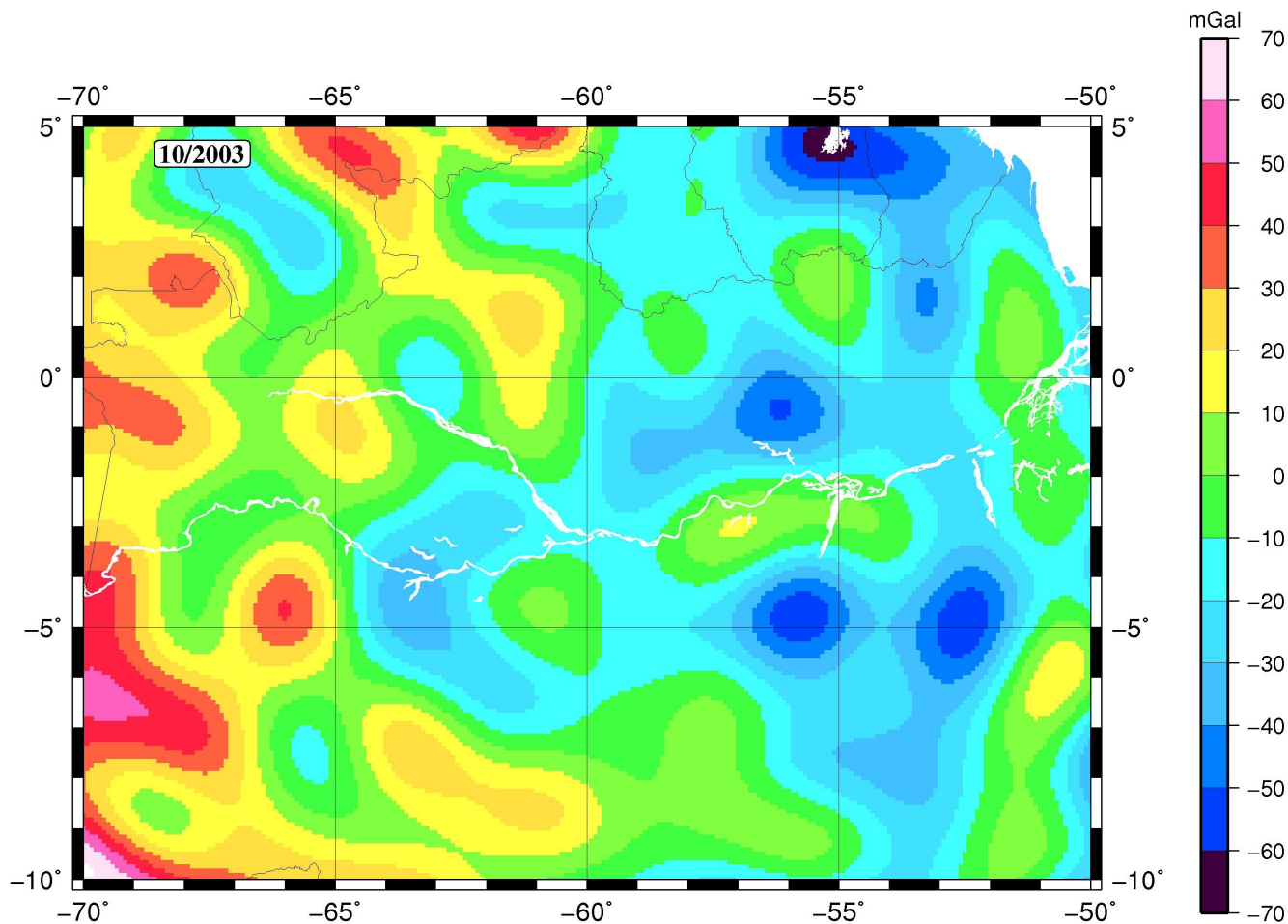
# 2003



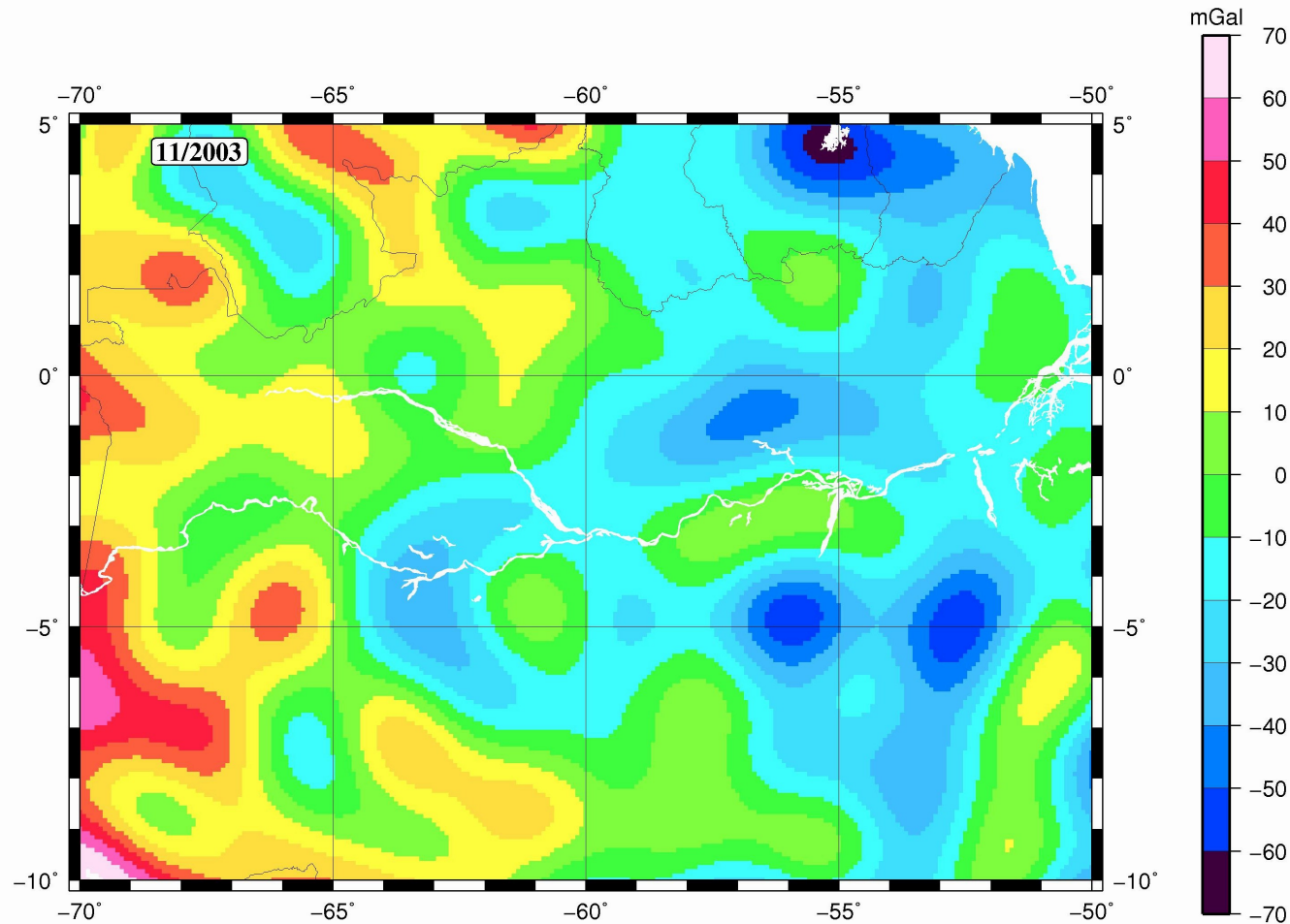
# Setembro 2003



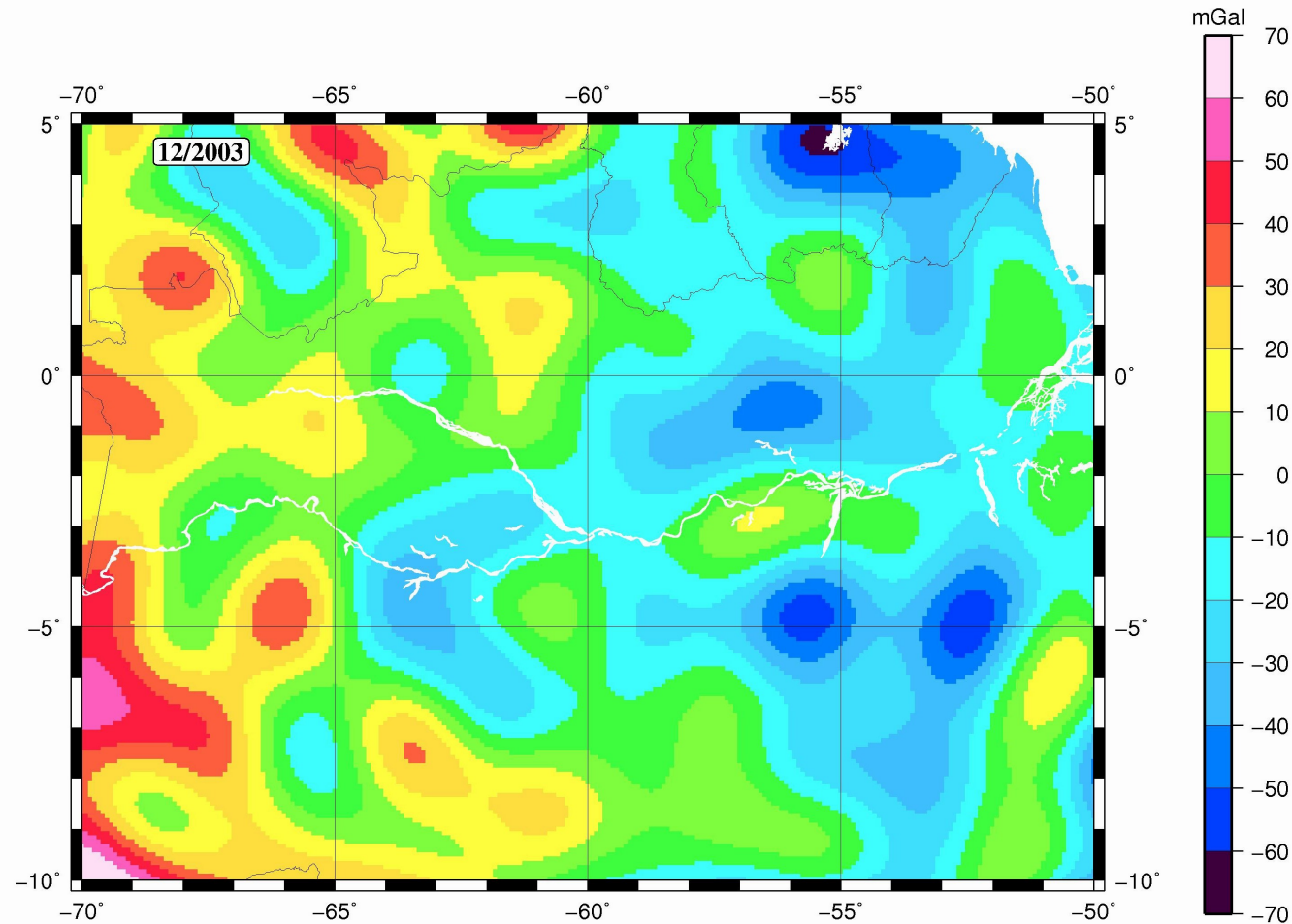
# Outubro 2003



# Novembro 2003

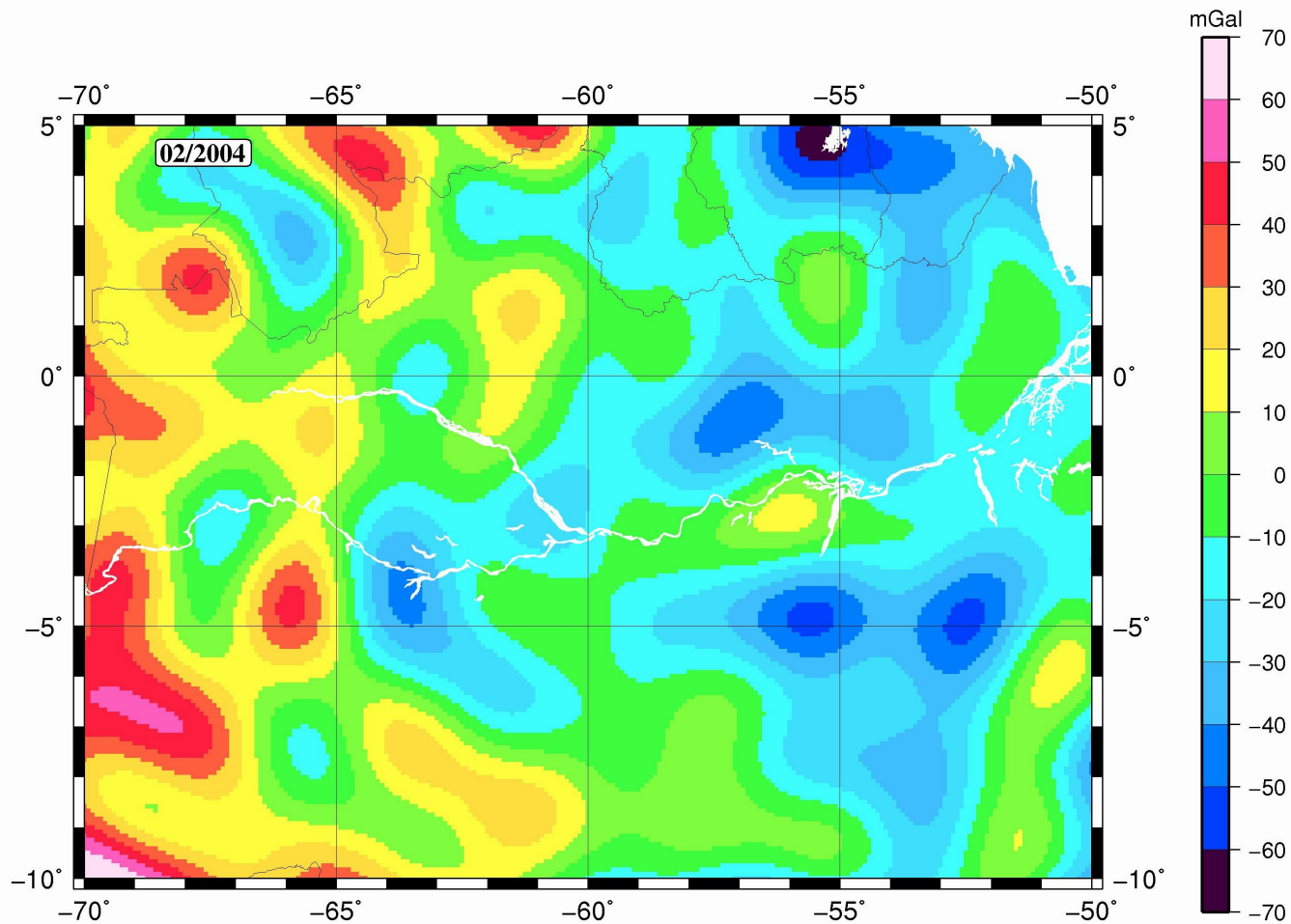


# Dezembro 2003



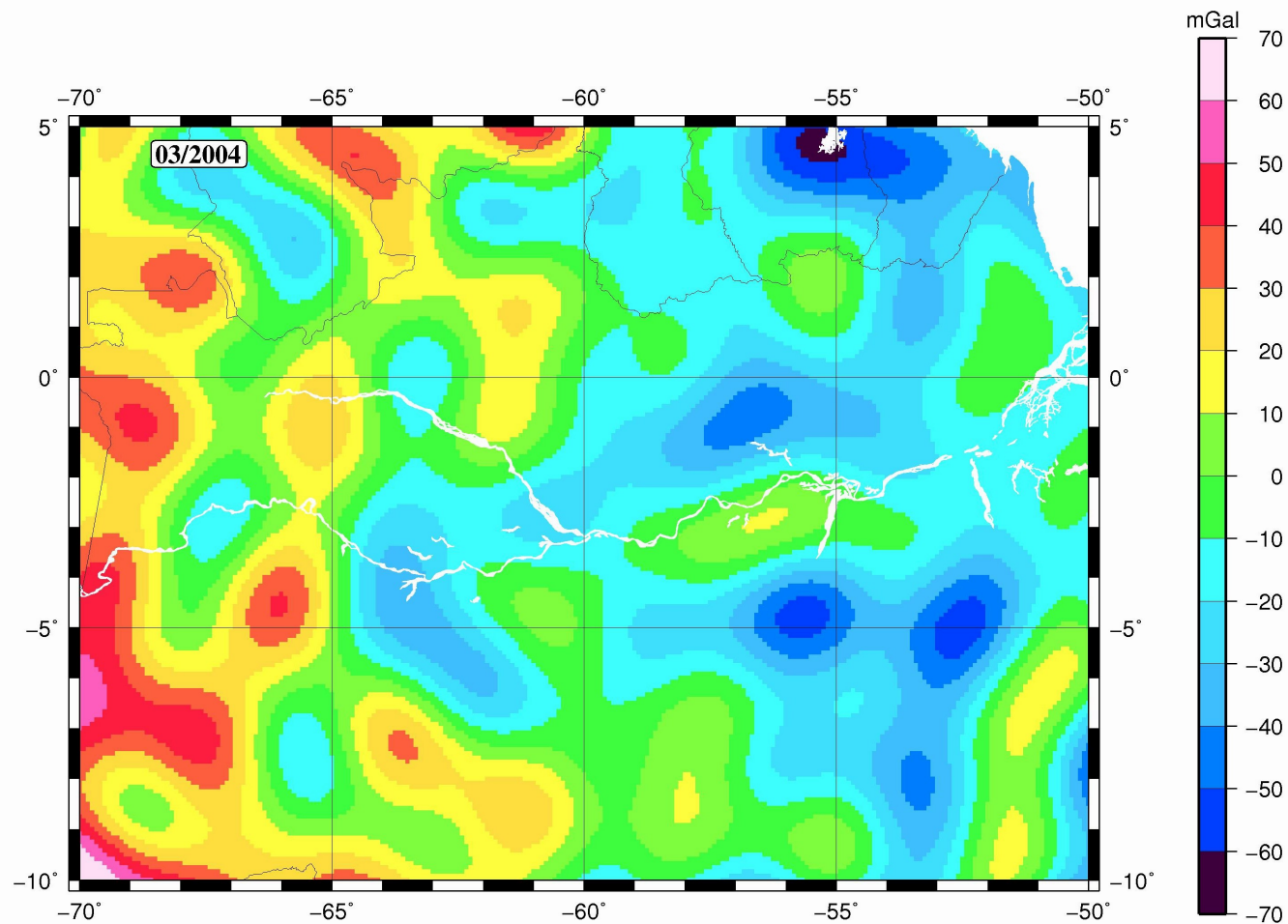


# Fevereiro 2004



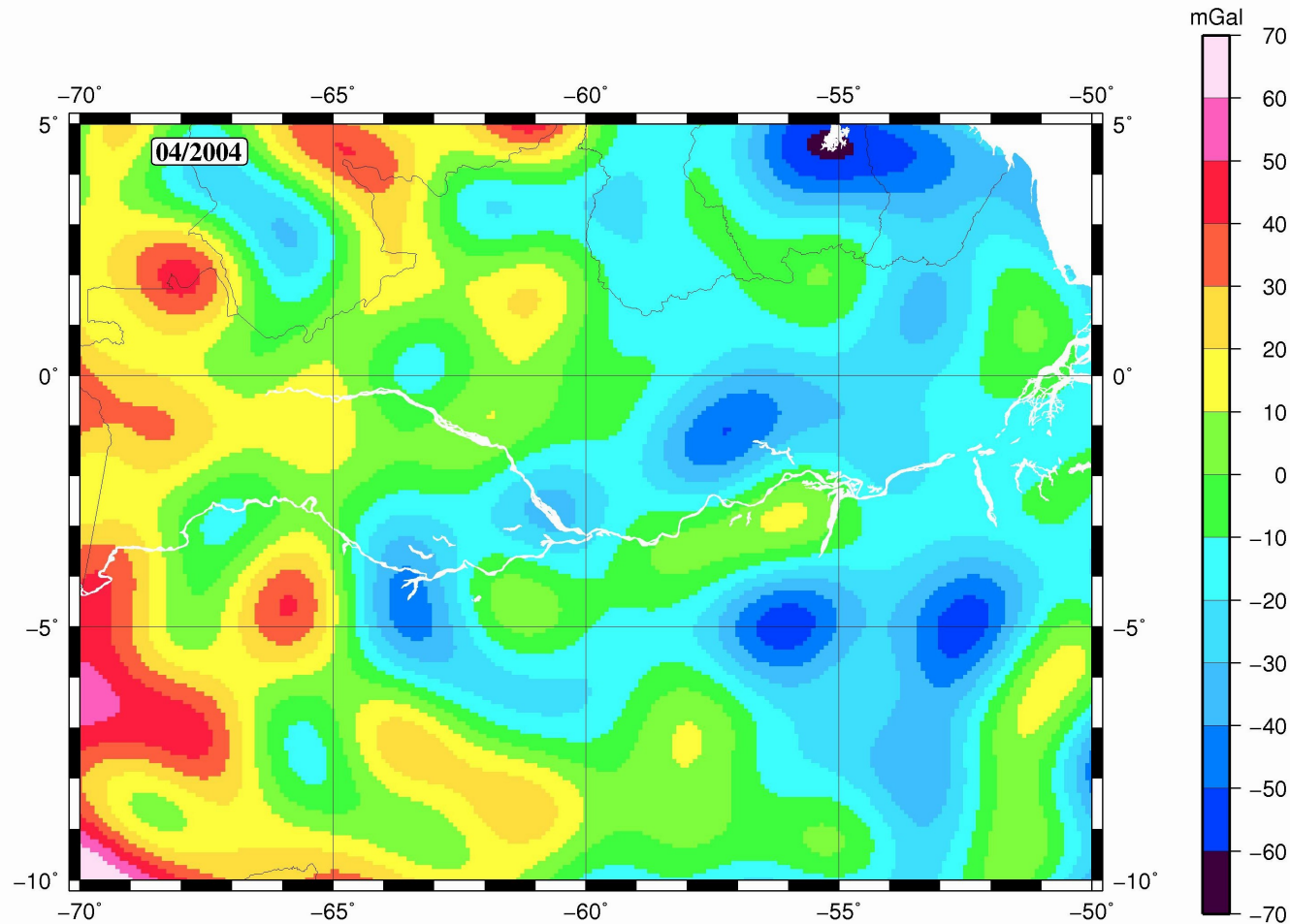
# Março

# 2004



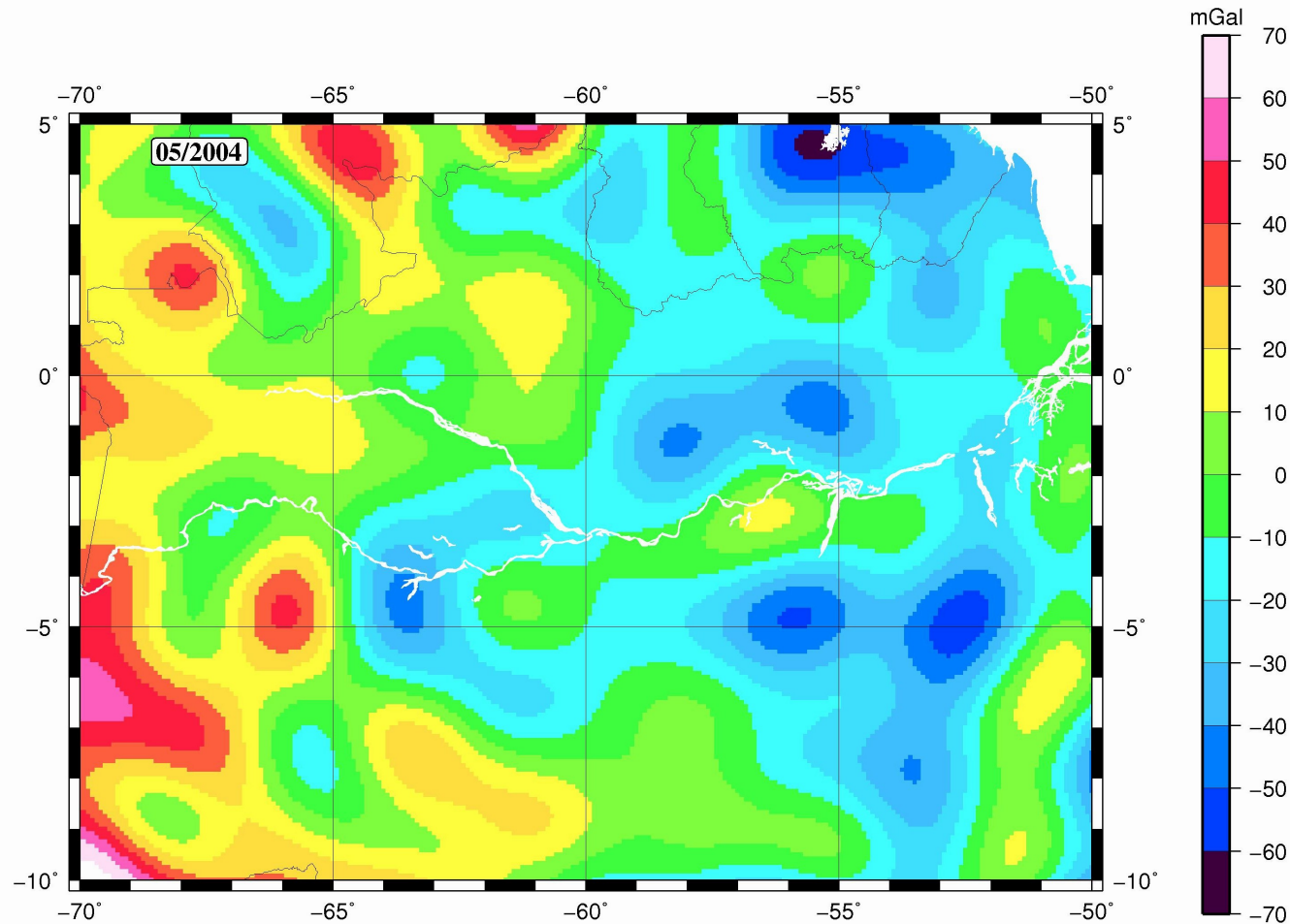
# Abril

# 2003



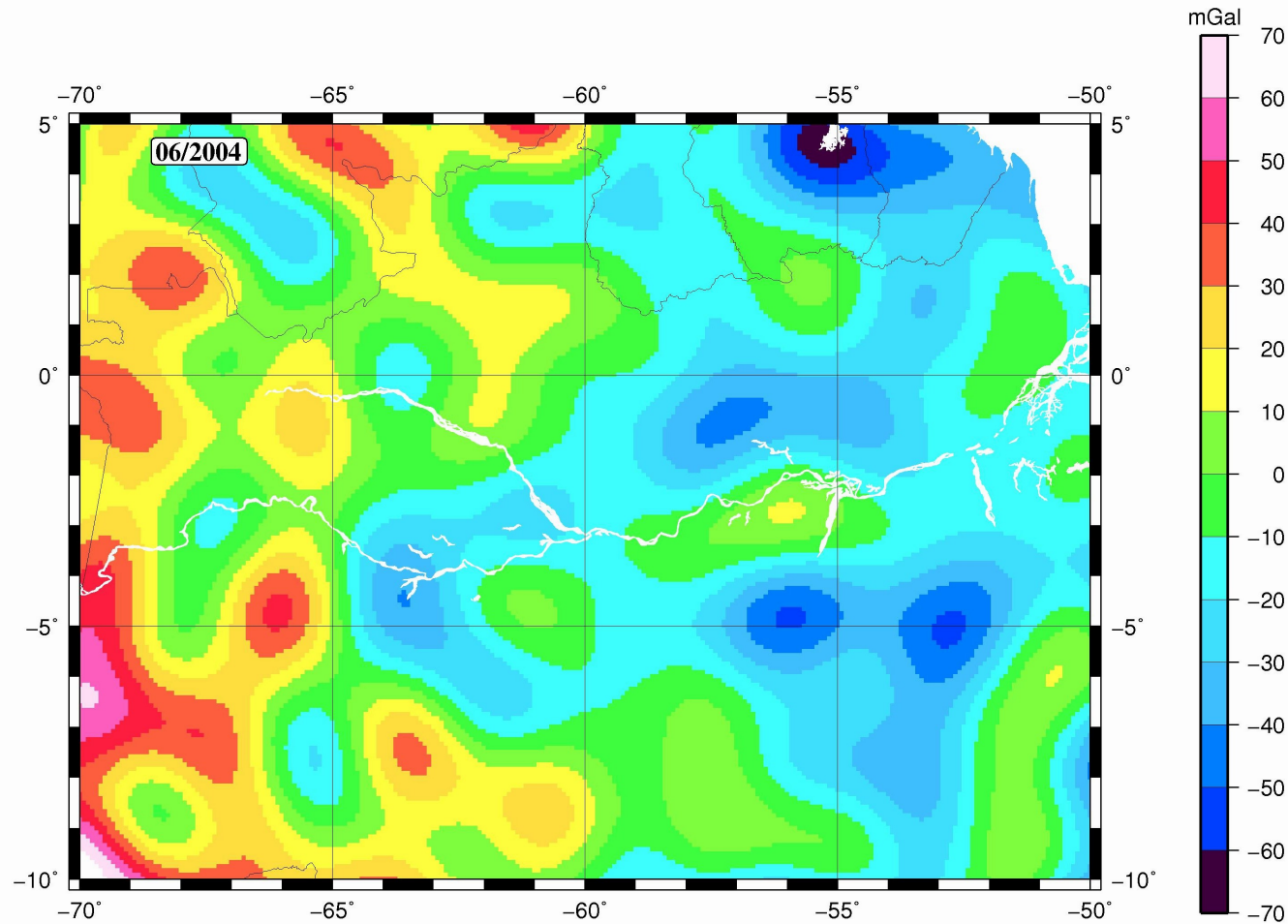
# Maio

# 2003



# Junho

# 2003



# Julho

# 2003

