



# Análise do Geopotencial a partir de Mapas Batimétricos da Bacia de Campos

Hans S. Santos, Raphael C. Silva, Karen L. Henz, Flávia F. R. Souza e Marcos L. R. Penna

**Resumo** - Este trabalho apresenta a análise do geopotencial da principal região produtora de petróleo do Brasil, a Bacia de Campos. Foram construídos mapas batimétricos que permitem a obtenção da profundidade do mar nos campos produtores e plataformas em operação na região. Foram obtidos os mapas de altitude geoidal e anomalia da gravidade que foram correlacionados ao relevo marinho. Além disso, foi possível a identificação da Província de Diápiros de Sal localizada em uma região com uma forte e negativa anomalia da gravidade.

**Palavras-chave:** Análise do Geopotencial, Batimetria, Bacia de Campos, Gravidade

## Geopotential Analysis from Bathymetric Maps of the Campos Basin

**Abstract** - This paper presents the geopotential analysis of the main oil producing region of Brazil, the Campos Basin. They were built bathymetric maps that allow taking the water depth in the producing fields and platforms in operation across the region. They were obtained the geoid height map and gravity anomaly map that were related to the marine relief. Furthermore, it was possible to identify the Salt Diapirs Province located in a region with a strong and negative gravity anomaly.

**Keywords:** Geopotential Analysis, Bathymetry, Campos Basin, Gravity

### I. INTRODUÇÃO

Chamada "Era Espacial" teve início no século passado, quando a União Soviética lançou o primeiro satélite artificial em 1957, o *Sputnik*. Esse lançamento marcou o início de uma disputa entre os Estados Unidos e a antiga União Soviética que teve como uma de suas consequências um grande desenvolvimento nas tecnologias de foguetes e satélites [1]. Desde então, as investigações e modelagem do campo de gravidade da Terra vêm sendo conduzidos com muito sucesso através de observações das perturbações ocasionadas nas órbitas dos satélites localizados em baixas altitudes [2].

Segundo Torge (2001) [3], a órbita real de um satélite se afasta da órbita ideal chamada de "kepleriana" devido aos efeitos de várias forças perturbadoras. Isso inclui as "partes não esféricas" da atração gravitacional da Terra, os efeitos gravitacionais da Lua e do Sol, a resistência do ar atmosférico e a pressão da radiação solar. Um satélite

pode ser considerado como um alvo em movimento em altitude elevada e, assim, pode ser utilizado para se determinar o posicionamento. Como a órbita do satélite é afetada pela campo gravitacional da Terra, o satélite pode também servir como um sensor para gravitação. Os satélites podem ser passivos, refletindo somente as ondas eletromagnéticas incidentes, ou eles podem ser ativos, contendo a bordo conjuntos de transmissores/receptores, diferentes tipos de sensores, relógios e computadores.

Na década de 1960, a inovação tecnológica e espacial possibilitou o uso frequente de satélites artificiais a partir de bases terrestres na determinação das componentes do campo da gravidade terrestre em escala global [4]. Segundo Seeber (2003) [5], nesta década, ocorreu o desenvolvimento de métodos de base para observações, cálculos e análise das órbitas de satélites. Como resultado desse avanço, ocorreu a publicação dos primeiros modelos globais de gravidade da Terra como, por exemplo, os modelos SAO SE I e SAO SE III do *Smithsonian Astrophysical Observatory*, e os *Goddard Earth Models (GEM)* - Modelos da Terra Goddard da *NASA Goddard Space Flight Center* [5].

Segundo Featherstone (2002) [6], os Modelos Geopotenciais Globais chamados de GGM (*Global Geopotential Model*) podem ser classificados em três classes principais:

1. "GGMs Somente Satélite" que são calculados somente a partir do rastreamento de satélites artificiais da Terra;
2. "GGMs Combinados", calculados a partir da combinação de um modelo somente satélite, gravimetria terrestre e aérea e altimetria por satélite – informações de gravidade calculadas em áreas marinhas; e
3. "GGMs com Cauda", calculados a partir do refinamento de GGMs existentes (satélite ou combinado) usando informações de gravidade de resolução maior e que não foram usadas previamente.

Esses modelos são disponibilizados como coeficientes de uma expansão em série de harmônicos esféricos que necessita ser truncada em um determinado grau. Essa expansão pode ser usada para calcular o campo de gravidade de quase todo o planeta [4]. Segundo Seeber (2003) [5], o primeiro modelo chamado SAO SE (*Standard Earths of the Smithsonian Astrophysical Observatory*) foi baseado em mais de 45.000 observações de 12 estações terrestres para 13 satélites, tendo como resultado o desenvolvimento de um modelo com grau 8. O avanço tecnológico das últimas décadas possibilitou a construção dos modelos *Earth Gravitational Model* como o EGM 96 com grau 360 e o EGM 2008 com grau 2190 [4].

A Bacia de Campos está localizada no litoral sudeste do Brasil, costa do estado do Rio de Janeiro. Ela ocupa uma área de cerca de 120.000 km<sup>2</sup>. Deste total, somente 500 km<sup>2</sup> situa-se no continente [7]. Grandes áreas como a da Bacia de Campos podem ser estudadas com

eficiência e economia através da utilização de satélites que orbitam o planeta coletando uma imensa quantidade de dados. Segundo Dalazoana (2005) [8], esta técnica usa um satélite munido de um sensor denominado radar altímetro que transmite pulsos na frequência das microondas e recebe o sinal de retorno após a reflexão na superfície da Terra. Os dados coletados são utilizados em atividades como a navegação, estudos relacionados com o equilíbrio, mecanismos e variabilidade do sistema oceânico e em pesquisas climáticas. Além disso, a técnica também contribuiu para o mapeamento da figura da Terra, na melhoria do conhecimento do campo da gravidade e assim na elaboração de modelos geopotenciais.

Os modelos para o campo de gravidade em todo o planeta com dados oriundos de satélites podem ampliar o conhecimento das componentes do campo de gravidade local ou global. Nesse contexto, o modelo de gravidade EGM 2008 provê dados de gravidade na forma de coeficientes harmônicos esféricos plenamente normalizados com grau 2190 e ordem 2059, o que permite investigar tantos as componentes de baixas frequências, quanto as componentes de grandes frequências do campo de gravidade [9].

Neste artigo, o modelo desenvolvido em seu grau máximo foi usado para estudar a Bacia de Campos, a principal região produtora de petróleo brasileiro. Além disso, os dados altimétricos do Modelo *Topex Global Topography V.18.1* na forma de arquivo xyz ([http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get\\_data.cgi](http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi)) permitiram, por meio de interpolação por mínima curvatura realizada no programa *Oasis/Montaj*, a construção de mapas de profundidades do oceano (mapas batimétricos) de toda a região da Bacia de Campos.

Neste trabalho, a Seção II descreve a região estudada; a Seção III descreve de forma sucinta a base teórica da investigação da gravidade terrestre através de satélites, bem como as principais características dos dois modelos utilizados: *Topex Global Topography V.18.1* e EGM 2008; a Seção IV apresenta os mapas obtidos através do processamento aplicado; e finalmente na Seção IV são sumarizadas as principais conclusões.

## II. A BACIA DE CAMPOS

As primeiras explorações na Bacia de Campos foram praticadas em terra, com a perfuração do poço estratigráfico 2-CST-1-RJ nas proximidades do Cabo de São Tomé na década de cinquenta. Sendo que os primeiros levantamentos sísmicos na área ocorreram apenas na década de sessenta [7]. Segundo Piquet (2003) [10], o primeiro poço 1-RJS-9A foi descoberto em 1974, situado em uma profundidade de 100 metros. Este poço deu origem ao Campo de Garoupa. Outros campos foram descobertos então, como Badejo, Garoupinha, Pampo, Namorado e Enchova. Em agosto de 1977, iniciou-se a produção comercial na bacia através do poço 1-EM-1-RJS (Enchova) com 127 metros de profundidade. Em 1984, ocorreram as descobertas dos primeiros campos gigantes em águas profundas (profundidades de 400m a 1.000m), como os campos de Marimbá (poço 1-RJS-284), Albacora (poço 1-RJS-297) e o campo de Marlim (poço 1-RJS-219). Poços com mais de 2.000 metros de profundidade ainda foram descobertos, como o campo de Marlim Sul (poço 1-RJS-382) com profundidade variando de aproximadamente 850 metros até 2.450 metros.

A Bacia de Campos (Fig. 1) possui mais de 100 mil quilômetros quadrados. Sua extensão vai da costa norte do estado do Rio de Janeiro, nas mediações da cidade de Arraial do Cabo ao sul do estado do Espírito Santo nas mediações da cidade de Vitória. A sede da Petrobras encontra-se em Macaé, onde são realizadas as principais atividades de exploração e produção de petróleo [11].

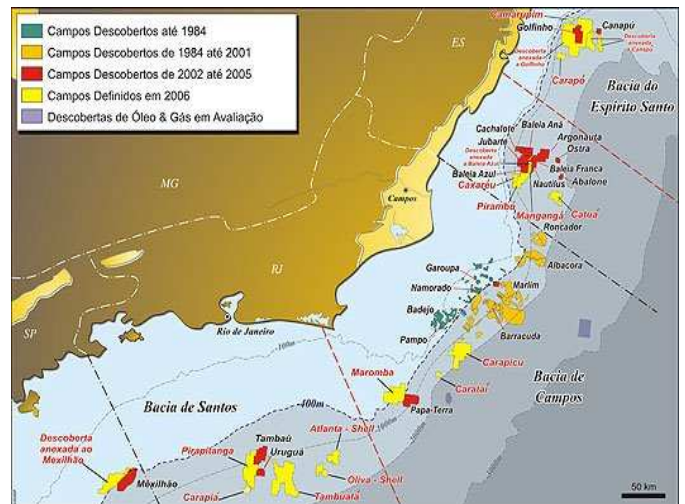


Fig. 1. Localização da Bacia de Campos [11].

Atualmente a Bacia de Campos é responsável por mais de 80% da produção nacional. As primeiras plataformas utilizadas foram as do tipo fixa, com jaquetas. Conforme a dificuldade foi aumentando com as explorações em grandes profundidades foram desenvolvidas unidades de produção flutuantes [11].

Bizzi *et al.* (2003) [7] resumiram a geologia da bacia através do mapa esquemático da Fig. 2 mostrando as bacias tectônicas, que são originadas por movimentos verticais da crosta e delimitadas por falhas normais com ângulos altos, a região de vulcanismo terciário ao longo do Alto de Cabo Frio e a região do vazio albião associado à zona de falha antitética de Cabo Frio.

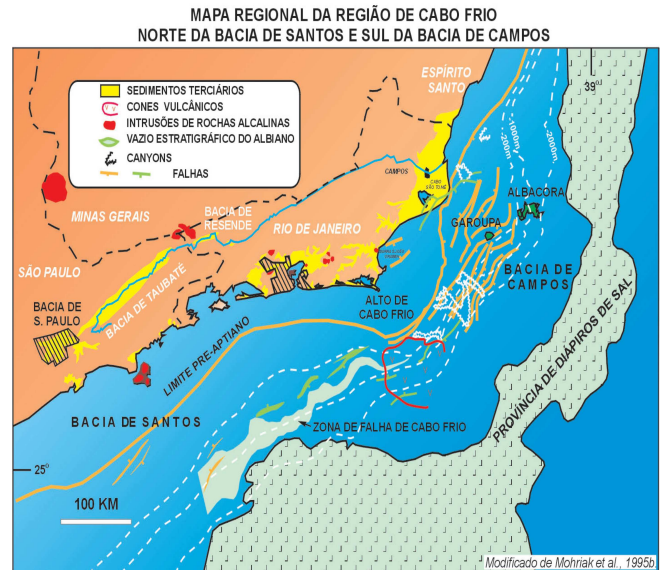


Fig. 2. Mapa geológico esquemático da Bacia de Campos [7].

## III. O ESTUDO DO CAMPO DA GRAVIDADE TERRESTRE A PARTIR DE DADOS DE SATÉLITES ALTIMÉTRICOS

### A. A Gravidade Terrestre

A magnitude da gravidade na Terra depende de cinco fatores: latitude, altitude, topografia, marés e variações de densidade na subsuperfície [12]. Segundo Torge (2001) [3], a modelagem do

campo de gravidade utiliza observações básicas e pode ser formulada como um problema de valor de fronteira da teoria de potenciais. Os modelos globais de gravidade são derivados, principalmente, a partir dos resultados de dados coletados por satélites no espaço, enquanto que a estimativa do campo de gravidade local é baseada principalmente em dados coletados em terra.

Segundo Torge (2001) [3], um corpo em rotação com a Terra experimenta a força gravitacional das massas da Terra e de outros corpos celestes, bem como a força centrífuga em virtude da rotação da Terra. A resultante dessas forças é a força da gravidade.

No caso de uma partícula  $m$  atraída por um corpo  $M$  que é composto de várias partículas distantes  $r$  de  $m$ , a "força gravitacional"  $\vec{f}^g$  pode ser escrita como uma soma das atrações exercidas sobre  $m$  pelas partículas de  $M$ . Se o corpo  $M$  é contínuo, as massas sobre o volume  $v$  do corpo são integradas, o que é equivalente a serem somadas:

$$\vec{f}^g = -Gm \int \frac{dM}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \tag{1}$$

em que  $dM = \rho dv$ , sendo  $\rho$  a massa específica do corpo e  $G$  a constante da gravitação universal [4].

Seja uma rotação com velocidade angular constante  $\omega$  com um raio de rotação  $\vec{p}$ , em torno de um eixo considerado fixo em relação ao planeta com latitude geocêntrica  $\varphi$ . Além da força gravitacional, uma outra força associada à rotação do planeta atua sobre as massas vinculadas à Terra:

$$\vec{f}^r = \vec{p}\omega^2 m \tag{2}$$

Essa força é denominada "força centrífuga"  $\vec{f}^r$  (Fig. 3):

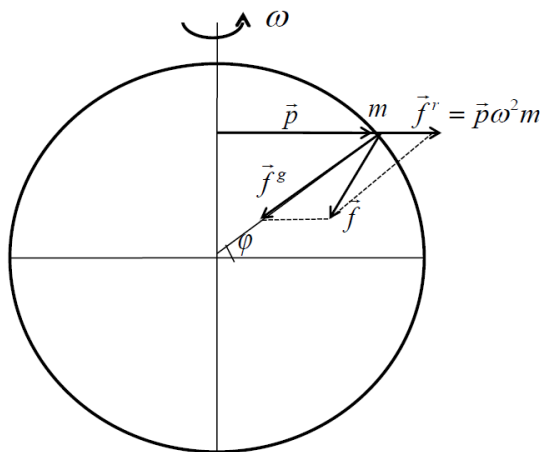


Fig.3. Componentes da força da gravidade [4].

Na Fig. 3, que apresenta as componentes da força da gravidade, percebe-se uma diminuição da aceleração da gravidade dos polos ao equador, devido ao aumento raio de rotação  $\vec{p}$  da Terra e, conseqüentemente, da força  $\vec{f}^r$ . A resultante entre as forças gravitacional e centrífuga constitui a chamada "força da gravidade"  $\vec{f}$  dada pela Eq. 3, sendo que o "campo da gravidade" correspondente  $\vec{g}$  é dado pela Eq. 4 [4].

$$\vec{f} = -Gm \int \frac{dM}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} + \vec{p}\omega^2 m \tag{3}$$

$$\vec{g} = -G \int \frac{1}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} dM + \vec{p}\omega^2 \tag{4}$$

Pode-se medir este campo ou as variações dele na superfície da Terra, no ar, no mar, dentro de um poço ou dentro de uma mina por meio de equipamentos chamados de gravímetros [13]. Além disso, a gravidade pode também ser medida a partir de observações de satélites, que em geral são menos precisas que os levantamentos locais por gravímetros, porém permitem a coleta de dados de forma uniforme e em áreas muito maiores. Assim, estudos da gravidade possuem diversas aplicações como, por exemplo, posicionamento tridimensional local, regional ou global e determinação do geóide como realizado neste trabalho, além de medidas e modelagem de fenômenos geodinâmicos e exploração de recursos minerais [5].

O elipsoide de referência internacional ou simplificada chamado "elipsoide" é uma aproximação matemática para a forma da Terra real. Sua utilização se dá para fins de cálculos de posições. Para fins de estudo do campo de gravidade, adota-se um elipsoide com mesma massa e velocidade de rotação que a Terra real. Esse modelo representa a Terra "normal". Devido às características dessa Terra "normal", ela "produz" as superfícies equipotenciais de gravidade, os chamados *esferopes* [14].

O geóide, por sua vez, reflete a verdadeira distribuição de massa no interior da Terra, porém ele difere do elipsoide teórico por pequenas quantidades. Estruturas crustais como continentes e montanhas, cristas médias oceânicas (Fig. 4a) e heterogeneidades de densidades do subsolo (Fig. 4b) influenciam a forma do geóide. Ao longo dos continentes, o geóide é afetado pela massa da terra acima do nível médio do mar. Isto ocasiona uma elevação local do geóide em relação ao elipsoide. O deslocamento entre o geóide e o elipsoide é chamado de altitude do geoidal [14].

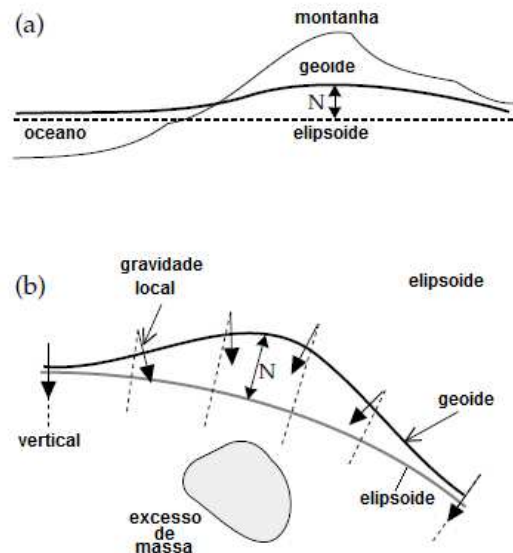


Fig. 4. (a) Influência do relevo no geóide (b) Influência de heterogeneidades de densidades do subsolo no geóide [14].

A anomalia da gravidade e a altitude geoidal podem ser deduzidas segundo Gemael (1999) [15] e por meio da Fig. 5:



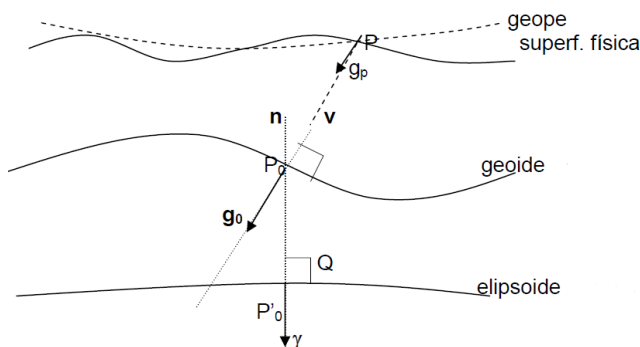


Fig. 5. Superfícies equipotenciais usadas na dedução da anomalia da gravidade e altitude geoidal. Adaptado de [16].

A anomalia da gravidade ( $\Delta g$ ) é definida como a diferença entre a magnitude da gravidade do ponto, reduzido ao geoide, e a gravidade normal do ponto (no elipsoide):

$$\Delta g = g_0 - \gamma \quad (5)$$

Assim, o valor da gravidade é medido na superfície física da Terra e reduzido ao geoide. Já a gravidade normal ou teórica é calculada sobre o elipsoide. A separação entre as superfícies do elipsoide e a do geoide é denominada altitude geoidal [16].

Segundo Heiskanen e Moritz (1967) [17], a partir dos coeficientes dos harmônicos esféricos plenamente normalizados  $\delta C_{nm}$  e  $S_{nm}$ , disponibilizados por um GGM, as Eqs. 6 e 7 possibilitam, respectivamente, os cálculos da altitude geoidal  $N$  e da anomalia da gravidade  $\Delta g$ .

$$N = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=2}^L \sum_{m=0}^n (\delta C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \text{sen} m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \quad (6)$$

$$\Delta g = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^L (n-1) \sum_{m=0}^n (\delta C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \text{sen} m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \quad (7)$$

Nessas equações,  $(r, \theta, \lambda)$  são as coordenadas esféricas polares geocêntricas do ponto desejado;  $P_{nm}$  são as funções associadas de Legendre plenamente normalizadas de grau  $n$  e ordem  $m$ .  $GM$  é a constante gravitacional geocêntrica e  $\gamma$  é a gravidade normal na superfície do elipsoide de referência [18].

### B. O Estudo do Campo da Gravidade Terrestre por Satélites Altimétricos

De acordo com Seeber (2003) [5], um satélite é usado como uma plataforma em movimento para um sensor que transmite impulsos de microondas para o chão e recebe os sinais de retorno após reflexão na superfície da Terra. Um sensor típico de microondas de satélite opera com frequência em torno de 13,5 GHz (banda Ku), correspondendo a um comprimento de onda de 2,2 cm.

Dalazoana (2005) [8] relacionou na Tab. 1 alguns detalhes típicos da altimetria por satélites:

Tab. 1. Características típicas da altimetria por satélites.

PARÂMETRO	VALOR
Frequência	13,5 GHz
Duração do pulso	12,5 nano-segundos
Tempo do duplo percurso do sinal	5 mili segundos
Raio de abertura da antena	1,6°
Frequência de repetição do pulso	1000 Hz
Raio do footprint	2 a 11 km
Velocidade média ao longo da trilha	6,7 km/s

A duração do pulso é de alguns nanossegundos com uma resolução de distância centimétrica. A resolução espacial do feixe de microondas recebido é determinada por uma área circular com diâmetro de alguns quilômetros que é chamada de "footprint" (Fig. 6) [5].

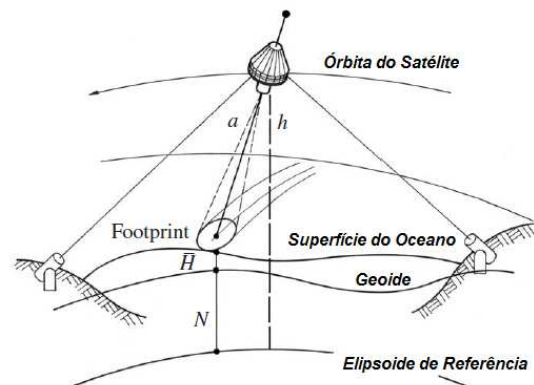


Fig. 6. Princípio simplificado da altimetria por satélite. Adaptado de [5].

Assim, segundo Seeber (2003) [5], a altitude "a" do satélite acima da superfície terrestre pode ser deduzida, como uma primeira aproximação, a partir do tempo de viagem observada " $\Delta t$ " do sinal de radar e da velocidade da luz "c":

$$a = c \frac{\Delta t}{2} \quad (8)$$

De modo simplificado e sem considerar algumas correções, as observações referem-se a uma altitude média da superfície do mar que difere do geoide pela separação "H". A altitude "h" do satélite acima do elipsoide de referência pode ser derivada de um cálculo de órbita em relação a um referencial geocêntrico, Sendo "N" a altitude geoidal, aproximadamente, tem-se:

$$h = N + H + a \quad (9)$$

A qualidade da altimetria por satélite evoluiu com o tempo. Segundo Dalazoana (2005) [8], foi durante as missões SKYLAB que a altimetria por satélites foi testada pela primeira vez entre 1973 e 1974. Nessas missões, a precisão obtida das medições foi de 1 a 2 m. Posteriormente, novas e melhoradas versões de altímetros permitiram precisões muito melhores. Possuem grande destaque as missões dos satélites GEOS-3 (1975), GEOSAT (1985), ERS-1 (1991), TOPEX/POSEIDON - T/P (1992) e JASON-1 (2001). A Tab. 2 (Anexo) resume as principais características dessas missões.

### C. O Modelo Topex Global Topography V.18.1

O modelo de topografia global *Topex Global Topography V.18.1* foi desenvolvido pelo Instituto de Oceanografia da *University of San Diego*. O modelo é uma evolução de modelos de topografia oceânica de Smith e Sandwell (1997) [19] onde a ideia principal é que a

estimativa do fundo oceânico pode ser obtida a partir de dados de anomalias de gravidade e acuradas medidas de profundidades oceânicas usadas para calibração. Nesse caso, modelos de compensação isostática da topografia oceânica fornecem uma função de transferência espectral que prediz a anomalia da gravidade esperada da topografia do fundo do mar.

O primeiro modelo recebeu diversas melhorias ao longo dos anos como a incorporação de dados de navios munidos de ecobatímetros especialmente nas regiões costeiras, além da utilização de modelos de gravidade global mais novos. Segundo Sandwell *et al.* (2013) [20], hoje ele incorpora dados de altimetria dos satélites GEOSAT e ERS-1 e também os dados mais recentes dos satélites ENVISAT, CRYOSAT-2 e JASON-1. Esse modelo possui dados com uma resolução de 1 min que cobrem as latitudes de -80 a +80 graus ao redor da Terra. Os dados do último modelo V.18.1 permitiram a construção do mapa de profundidades do fundo mar da Bacia de Campos. Esses dados podem ser obtidos na forma de arquivo xyz em [http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get\\_data.cgi](http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi).

#### D. O Modelo EGM 2008

O *Earth Gravity Model 2008* (EGM 2008) é um modelo gravitacional global derivado de dados de satélite e observações de gravidade terrestres e oceânicas. Esse modelo com grau 2190 e ordem 2159 em termos dos coeficientes harmônicos, foi disponibilizado através da *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) para o potencial externo da Terra com uma resolução espacial em torno de 9 km para o campo da gravidade em todo o globo [2].

O objetivo do modelo EGM 2008 é fornecer uma acurácia global do geóide com RMS (*Root Mean Square*) ou "valor quadrático médio" melhor que 15 cm [9].

Uma das principais ferramentas usadas na construção do modelo foram os satélites gêmeos da missão GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) originada justamente para levantar dados do campo de gravidade da Terra [9]. A missão utiliza dois satélites gêmeos localizados na mesma órbita polar em torno de 500 quilômetros de altitude e separados a 220 quilômetros [21].

Durante a orbitação, as regiões do planeta que possuem gravidade mais forte afetam primeiro o satélite líder que é afastado do segundo satélite. Então, por meio de um sistema de microondas na banda K, as velocidades e distâncias entre os dois satélites são aferidas com ordem de um micrômetro e são relacionadas às mudanças da gravidade terrestre que estão correlacionadas às mudanças na massa (topografia) e irregularidades nas distribuições de densidades. Citam-se ainda, dentre outras, as missões TOPEX/POSEIDON, JASON-1, ERS-1/2, GEOSAT, ENVISAT, GFO, ICESAT, que tiveram colaboração na obtenção de dados [9]. Segundo Rummel (2012) [22], os dados coletados pelo satélite GOCE (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*) lançado em março de 2009, primeiro satélite equipado com gradiômetro gravitacional, em conjunto com os dados da missão GRACE permitirão ainda a construção de uma nova geração de modelos para determinação do geóide com acurácia melhor que 3 cm.

Os dados do modelo EGM 2008 permitiram a construção dos mapas de altitude geoidal e anomalia da gravidade da Bacia de Campos, que foram correlacionados com o relevo submarino e com heterogeneidades da subsuperfície da região.

## IV. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

### A. Batimetria da Bacia de Campos

Da mesma forma que os mapas topográficos representam as características tridimensionais de terreno, mapas batimétricos ilustram a superfície submersa do relevo de mares, lagos e rios. Esses mapas podem ser construídos por meio de satélites altimétricos que fornecem, além da elevação dos continentes, a profundidade dos oceanos [23]. Para a investigação da batimetria da Bacia de Campos, foram utilizados os dados altimétricos do modelo *Topex Global Topography V.18.1* que foram atualizados no dia 28/11/2014. Em relação ao modelo anterior dos mesmos autores Sandwell *et al.* (2013) [20], ocorreram duas melhorias, o uso do modelo de gravidade global V.23 ([http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get\\_data.cgi](http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi)) dos mesmos desenvolvedores para a estimativa da topografia, além da adição de 111 medições ecobatimétricas multifeixe de cruzeiros que permitiram uma melhor calibração dos dados. Por meio desses dados foi realizada a construção dos mapas de profundidades do oceano de toda a região da Bacia de Campos.

Os dados altimétricos uniformemente espaçados possuem resolução de 1 minuto e cobrem inteiramente a Bacia de Campos e também o seu continente. Os dados foram processados através do programa *Oasis Montaj*.

A escala de cores adotada usou como limites os valores mínimos e máximos dos dados e os intervalos foram construídos por meio do método de "área equivalente", no qual o programa avalia estatisticamente os valores do *grid* de forma que cada cor ocupe aproximadamente uma mesma área no mapa.

Foi usada interpolação por mínima curvatura com células de ¼ da resolução. Logo, a célula utilizada para o *grid* foi de 0,25 min. O mapa resultante em 2D é mostrado na Fig. 7.

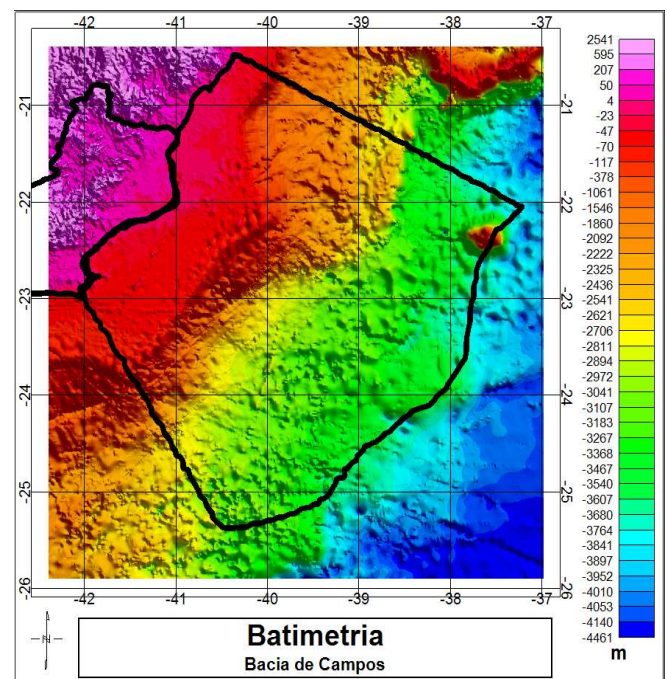


Fig. 7. Mapa batimétrico 2D da Bacia de Campos mostrando as profundidades do mar e também as altitudes do continente.

Avaliando o mapa obtido da Fig. 7, é possível separar a região continental em rosa, a região de águas rasas em vermelho com profundidades de até 400m, as regiões de águas profundas em laranja escuro com até 1.000m e ultraprofundas com as cores laranja claro, amarelo, verde e azul que representam profundidades maiores que 1.000m.



Também foi confeccionado um mapa batimétrico cobrindo uma área menor com uma escala diferente onde se localizam a maior parte dos campos produtores (Fig. 8) e unidades marítimas (Fig. 9).

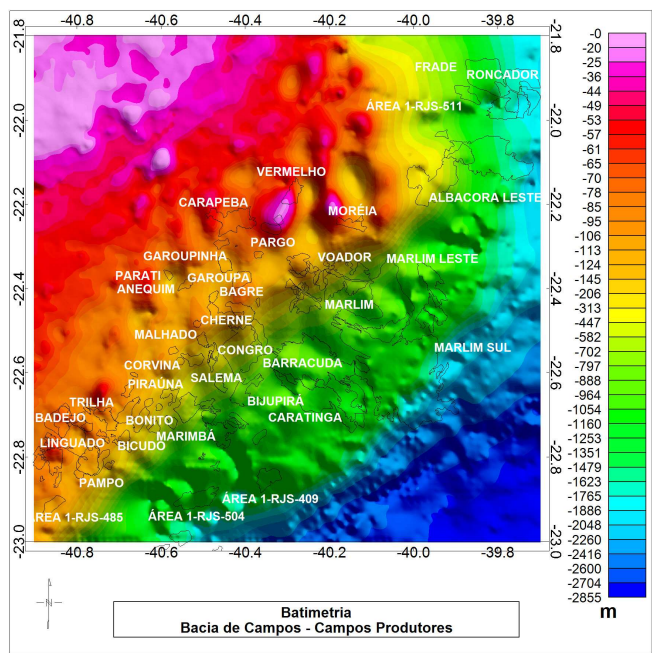


Fig. 8. Mapa batimétrico 2D da Bacia de Campos mostrando a localização dos principais campos petrolíferos.

No mapa acima (Fig. 8) é possível identificar os campos de profundidade (lâmina d'água) rasa (até 400m), como: Vermelho, Moréia, Carapeba, Pargo, Garoupinha, Garoupa, Bagre, Parati, entre outros; profunda (400m a 1.000m): Marlim, Voador, Namorado, Malhado, Barracuda, Bijupirá, entre outros, e ultraprofundas (acima de 1.000m), como: Marlim Sul, Marlim Leste, Albacora Leste e Caratinga, entre outros.

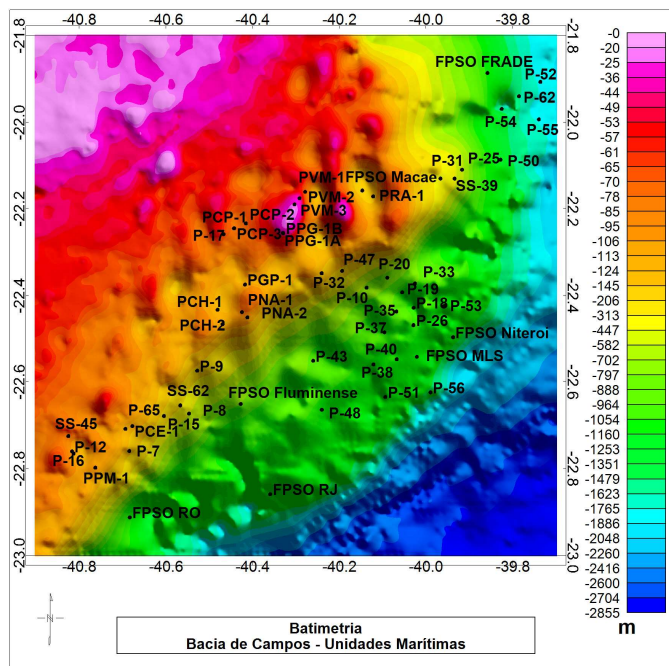


Fig. 9. Mapa batimétrico 2D da Bacia de Campos mostrando a localização das principais unidades marítimas.

É possível identificar no mapa da Fig. 9, as plataformas de petróleo da Bacia de Campos, em águas rasas (até 400m) como: P-17, P-9, P-7, PRA-1, entre outras, águas profundas (400m à 1.000m): P-43, P-10, P-20, P-25 e em águas ultraprofundas (acima de 1.000m): P-55, P-62, P-50, P-54, P-52, entre outras.

Também foi gerado o mapa batimétrico 3D da Bacia de Campos, que mostra seu relevo marinho e suas principais feições morfológicas (Fig. 10). É possível identificar no mapa os limites da Bacia de Campos, Alto de Vitória e Alto de Cabo Frio. Também é possível identificar na região Nordeste do mapa, a Cadeia Vitória-Trindade e o Monte Submarino Almirante Saldanha.

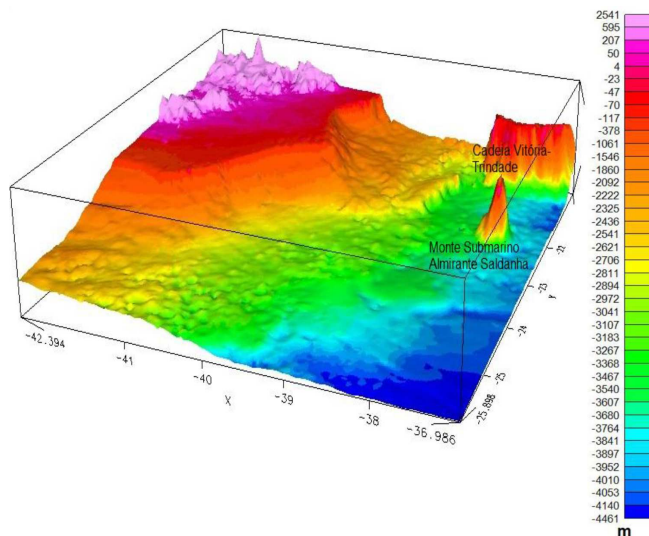


Fig. 10. Mapa batimétrico 3D da Bacia de Campos com vista do Sul para o Norte, onde x representa a longitude e y representa a latitude.

Os mapas permitem identificar as principais feições do relevo marinho da Bacia de Campos, bem como a sua profundidade (lâmina d'água). Avaliando o mapa batimétrico 3D da Bacia de Campos (Fig. 10), é possível identificar o continente em rosa, a região de plataforma continental em vermelho, região de talude em laranja, que é a região que marca a transição entre a crosta continental e a crosta oceânica, e a planície abissal em verde e azul.

### B. Altitude Geoidal e Anomalia da Gravidade da Bacia de Campos

Os dados utilizados no trabalho foram do modelo EGM 2008 de Pavlis *et al.* (2012) [24]. Os dados foram acessados através do programa *Geoid* que utiliza o GRS 80 (*Geodetic Reference System* 1980) como elipsoide de referência. Foram extraídos dados de anomalia da gravidade e altitude geoidal da região da Bacia de Campos e adjacências. Os dados foram extraídos com máximo grau e ordem disponibilizados pelo programa que foi grau 2190 e ordem 2159. Os mapas foram confeccionados através de interpolação por mínima curvatura com resolução de 0,3 grau e célula de um quarto da resolução, ou seja, 0,075 grau. A aquisição dos dados ocorreu em um quadrante onde a longitude variou de -42,4 até -37 graus, e a latitude variou de -26 até -20,6 graus cobrindo toda a Bacia de Campos e região.

Os mapas de altitude geoidal mostrados na Fig. 11 e Fig. 12 são dados pela diferença em metros entre o geóide e o elipsoide.

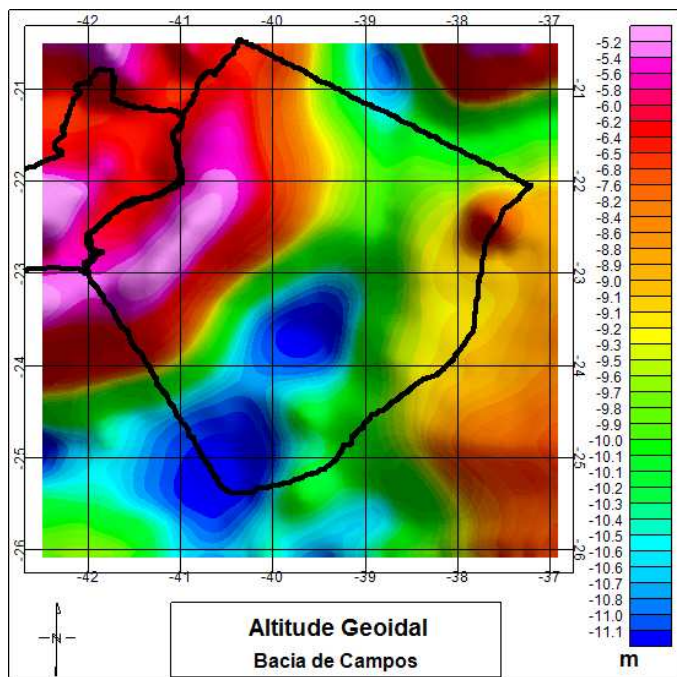


Fig. 11. Mapa da altitude geoidal da Bacia de Campos e arredores.

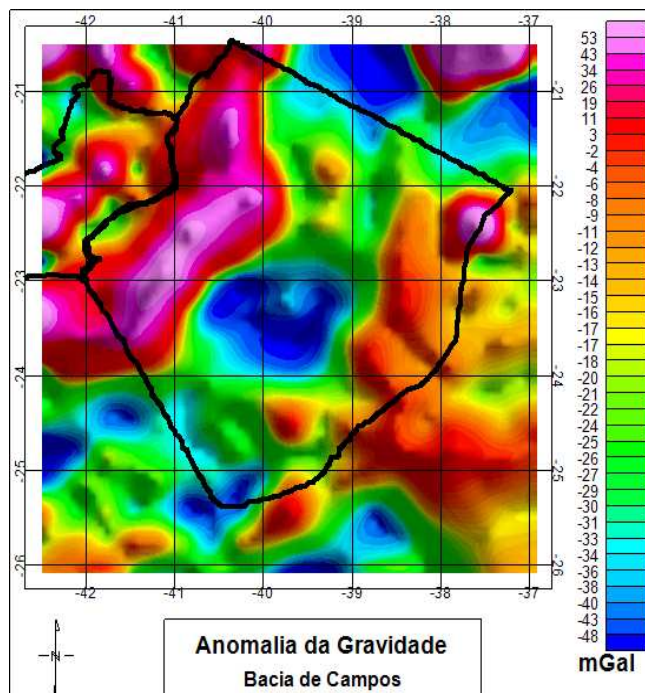


Fig. 13. Mapa da anomalia da gravidade da Bacia de Campos.

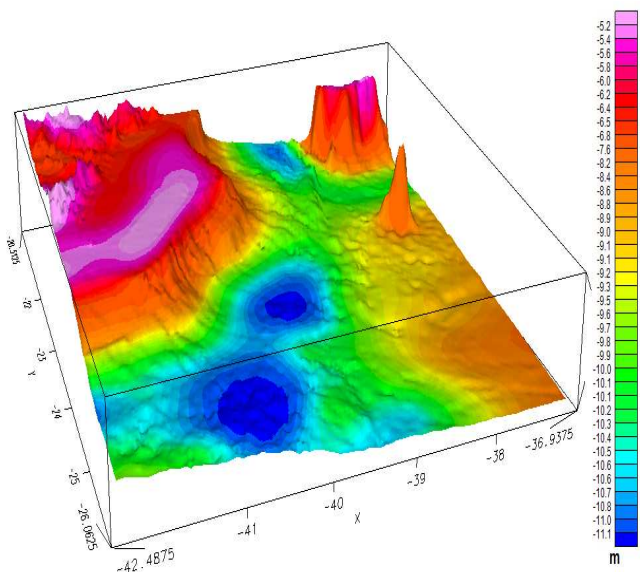


Fig. 12. Mapa da altitude geoidal da Bacia de Campos e arredores com vista 3D.

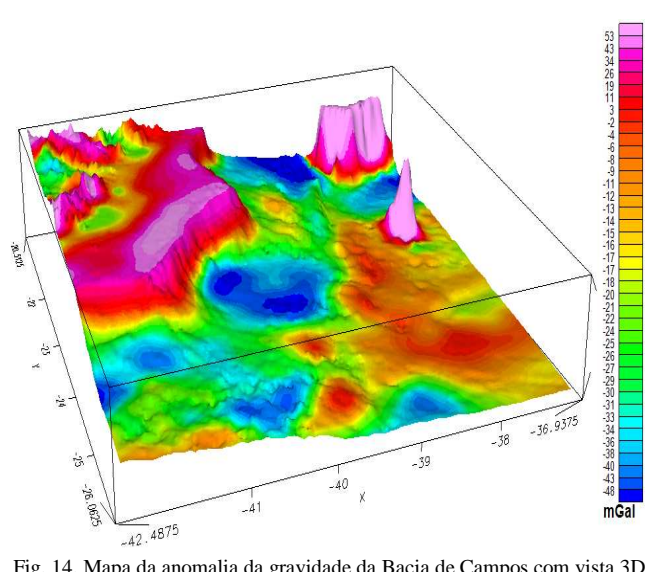


Fig. 14. Mapa da anomalia da gravidade da Bacia de Campos com vista 3D.

O mapa da altitude geoidal da Bacia de Campos apresentou valores negativos em toda a região, o que denota que o geóide está abaixo do elipsoide em todo o quadrante estudado. Os valores da altitude geoidal variaram de -5,2 até -11,1 metros. Os maiores valores foram encontrados na plataforma continental, região de talude, no monte submarino Almirante Saldanha e no Banco de Abrolhos, variando de -8,6 até -5,2 metros. Os menores valores foram encontrados na planície abissal com a altitude geoidal variando de -9,5 até -11,1 metros.

Os mapas de anomalia da gravidade da Bacia de Campos são mostrados nas Figs. 13 e 14.

A anomalia da gravidade variou de +53 mGal até -48 mGal. Foram localizadas fortes anomalias negativas próximo a -50 mGal no centro da bacia, logo após a plataforma continental e nas regiões sudoeste e nordeste do mapa, próximo às linhas que marcam o Alto de Cabo Frio e Alto de Vitória respectivamente. As anomalias positivas mais fortes foram encontradas na plataforma continental que é a região de menor profundidade da bacia e na parte leste do mapa nos arredores do monte submarino Almirante Saldanha onde a anomalia chegou a perto de +50 mGal.

A correlação espacial das Figs. 13 e 14 com o mapa geológico esquemático da Bacia de Campos (Fig. 2), permitiu identificar, em azul e verde, a Província de Diápiros de Sal formada principalmente por gipsita, halita e anidrita que são materiais geológicos de baixas densidades. A província identificada localiza-se em águas profundas da Bacia de Campos, estendendo-se desde a região sul até a região



nordeste com uma anomalia negativa variando de entorno -50 mGal até em torno de -20 mGal.

## V. CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram descritos os procedimentos de coleta e o processamento dos dados para a geração de mapas em escala de cores de profundidade oceânica e características gravitacionais da Bacia de Campos. Os mapas apresentados podem ser utilizados como uma referência em trabalhos futuros para a caracterização da região e localização espacial das principais unidades marítimas e campos produtores de petróleo.

As principais unidades marítimas e os principais campos produtores foram situados através dos mapas do relevo oceânico da Bacia de Campos, permitindo a separação dos campos e unidades em profundidades (lâmina d'água) rasa (até 400m), profunda (400m a 1.000m) e ultraprofundas (acima de 1.000m).

Os mapas gerados a partir da anomalia da gravidade e altitude geoidal da Bacia de Campos e adjacências foram correlacionados com a estrutura conhecida da região. Essa correlação permitiu identificar regiões com grandes contrastes de densidades na Bacia de Campos que foram associadas às regiões de maiores e menores profundidades do mar (lâmina d'água) bem como à Província de Diápiros de Sal.

A Província de Diápiros de Sal formada por materiais de baixa densidade (gipsita, halita e anidrita) ficou bem localizada em uma região de anomalia gravitacional forte e negativa.

Por fim, apesar de existirem modelos com resolução espacial melhores que os utilizados neste trabalho, os modelos *Topex Global Topography V.18.1* e EGM 2008 puderam retratar, respectivamente, as principais características altimétricas e gravitacionais da Bacia de Campos, pois se trata de uma extensa área territorial com mais de 100 mil km<sup>2</sup>, sendo desejável mas não fundamental, portanto, uma resolução melhor que a utilizada.

Com fim de avaliação da qualidade dos modelos *Topex Global Topography V.18.1* e EGM 2008, para estudos posteriores, recomenda-se um estudo comparativo entre os principais modelos de geopotencial disponíveis aplicados na Bacia de Campos ou uma validação dos modelos utilizados com dados GNSS/nivelamento.

## REFERÊNCIAS

- [1] O.C. Winter; A.F. B. A. Prado, "A Conquista do Espaço: do *Sputnik* à Missão Centenário," Editora Livraria de Física, UNESP. 2007.
- [2] L.F.S. Melo e S.R.C. Freitas, "Avaliação de Modelos Globais do Geopotencial para os Estados do Maranhão e Piauí," Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 18, no 2, p.203-224, abr-jun. 2012.
- [3] W. Torge, "Geodesy," Third completely revised and extended edition. Walter de Gruyter. Berlin, Germany. 2001.
- [4] I.P. Escobar. "Forma e Dimensões da Terra." Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Cartográfica. 2000.
- [5] G. Seeber, "Satellite Geodesy," Second completely revised and extended edition. Walter de Gruyter. Berlin, Germany. 2003.
- [6] W. E. Featherstone, "Expected contributions of dedicated satellite gravity field missions to regional geoid determination with some examples from Australia," Journal of Geospatial Engineering, 4, 2-19p. 2002.
- [7] L.A. Bizzi; C. Schobbenhaus; R.M. Vidotti; J.H. Gonçalves, "Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil," CPRM, Brasília, 2003.
- [8] R. Dalazoana, "Estudos Dirigidos à Análise Temporal do Datum Vertical Brasileiro," Tese de Doutorado. UFPR, Curitiba. 2005.
- [9] E.D. Saatkamp; C.V. Moraes; J.C. Farret, "Avaliação do modelo geoidal EGM2008 para o Brasil," Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30, INPE, p. 4303-4310. 2009.
- [10] R.P.S. Piquet, "Petróleo Royalties e Região," Rio de Janeiro. Ed. Garamond. 2003.
- [11] PETROBRÁS, "Principais Operações," Bacia de Campos. 2015. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/bacia-de-campos.htm>
- [12] W.M. Telford; L.P. Geldart; R.E. Sheriff, "Applied Geophysics," Cambridge University Press. 2004.
- [13] K.K. Roy, "Potential Theory in Geophysics." Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 2008.
- [14] W. Lowrie, "Fundamentals of Geophysics," Swiss Federal Institute of Technology, Zürich. Cambridge University Press. Second Edition. 2007.
- [15] C. Gemael, "Introdução à Geodésia Física," Curitiba: Editora da UFPR, 304 p, 1999.
- [16] J.M. Arana, "Introdução à Geodésia Física," Departamento de Cartografia da Unesp, 89p, 2009.
- [17] W.A. Heiskanen; H. Moritz, "Physical Geodesy," W.H. Freeman and Co. San Francisco. 1967.
- [18] I.P. Escobar "Modelo Geopotencial Global EGM 2008. Testes Realizados no Estado do Rio de Janeiro," II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE, 8-11 de setembro de 2008.
- [19] W. H. F. Smith; D. T. Sandwell, "Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings," Science, v. 277, 26 Sept., 1997.
- [20] D.T. Sandwell; E. Garcia; K. Soofi; P. Wessel; W.H.F. Smith, "Towards 1 mGal Global Marine Gravity from *CryoSat-2*, *Envisat* and *Jason-1*." The Leading Edge, 32(8), 2013.
- [21] E. P. Bomfim; E.C. Molina, "Análise da Variação dos Elementos do Campo de Gravidade do Aquífero Guarani a partir dos Dados GRACE," Revista Brasileira de Geofísica, 27(1): 17-34, 2009.
- [22] R. Rummel. "Height Unification Using *GOCE*," Journal of Geodetic Science, 2(4), 355-362, 2012.
- [23] C.S. Ferreira, L.S.P. Madureira, S. Klippel, S. Weigert, R.G.P. Habiaga, A.C. Duvoisin, "Mapas do Relevo Marinho das Regiões Sudeste, Sul e Central do Brasil: Acústica e Altimetria por satélite," Instituto Oceanográfico-USP. Série de documentos REVIZEE: Score Sul. São Paulo. 2005.
- [24] N. K. Pavlis, S. A. Holmes, S. C. Kenyon, J. K. "Factor The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)," J. Geophys. Res., 117, 2012.



Tab. 2. Características de algumas missões altimétricas. Adaptado de [8].

Missão	SKYLAB	GEOS-3	GEOSAT	ERS-1	T/P	JASON-1
Lançamento	1973	1975	1985	1991	1992	2001
Término da missão	1973	1978	1989	1996	2005	2013
Altitude média (km)	435	840	800,6	781,1	1336	1336
Latitude coberta		±65	±72	±81,46	± 66,04	± 66,04
Ciclo Orbital (Dias)			17,05	Variável	9,9156	9,9156
Frequência (GHz)			13,5	13,5	13,6/5,3	13,575/5,3
Ruído do Altimetro (cm)	>100	60	7	5	2	1,5
Precisão do Altimetro (cm)	100-200	25	4	3	2	2
Operador	NASA	NASA	US-NAVY	ESA	CNES e NASA	CNES e NASA