

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO DE ESTUDOS GERAIS - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

CARLOS EDUARDO PEREIRA PACHECO

TRATAMENTO GEOESTATÍSTICO DA BATIMETRIA DA
PLATAFORMA DE SANTOS

Niterói - RJ

- 2014-

CARLOS EDUARDO PEREIRA PACHECO

**TRATAMENTO GEOESTATÍSTICO DA BATIMETRIA DA
PLATAFORMA DE SANTOS**

Projeto de conclusão de curso apresentada ao Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Adalberto da Silva

Niterói - RJ

- 2014-

CARLOS EDUARDO PEREIRA PACHECO

**TRATAMENTO GEOESTATÍSTICO DA BATIMETRIA DA
PLATAFORMA DE SANTOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Aprovada em ____/____/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adalberto da Silva (Orientador)
Universidade Federal Fluminense - Departamento de Geofísica - UFF.

Prof. Dr. Alberto Garcia Figueiredo Jr. (Avaliador)
Universidade Federal Fluminense - Departamento de Geofísica - UFF.

Prof. Dr. Nicolas Bruno Gouturbe (Avaliador)
Universidade Federal Fluminense - Departamento de Geofísica - UFF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Localização da plataforma continental da bacia de Santos com o grid exploratório.....	11
Figura 2: Relação entre as funções variograma $\gamma(\mathbf{h})$ e covariograma $C(\mathbf{h})$ segundo Yamamoto (2001).	17
Figura 3: Gráfico de um semivariograma teórico onde se observam seus principais elementos como: o efeito pepita em (C_0), a variância espacial dentro do campo estruturado ($C_0 + C$), o limite de alcance da amplitude (a) do campo estruturado, representado no eixo da abscissa (distância) e o campo aleatório do variograma (YAMAMOTO, 2001).	19
Figura 4: Diagrama direcional exibindo os parâmetros de um variograma segundo Monteiro (2003).	21
Figura 5: Modelos de experimentais de variograma: (A) modelo gaussiano; (B) modelo esférico e/ou exponencial; (C) modelo esférico e/ou exponencial, com efeito, pepita; (D) efeito pepita puro, segundo Guimarães (2002).	23
Figura 6: Mapa de densidade amostral para um raio de busca de 1000 m.	29
Figura 7: Densidade amostral da batimetria para a área de abrangência da plataforma continental de Santos.	30
Figura 8: Superfície de tendências da batimetria da plataforma de Santos evidenciando uma tendência parabólica em direção à quebra da plataforma para as amostras de batimetria.	31
Figura 9: Mapas de batimetria bruta (A), regressão quadrática (B) e de resíduos (C) com as suas respectivas estatísticas para o setor 1 da plataforma de Santos.	34
Figura 10: Variogramas experimentais dos resíduos para o Setor-1 da Plataforma de Santos.	35
Figura 11: Variograma Omni-direcional experimental ajustado ao modelo teórico do resíduo para o setor 1 da plataforma de Santos.	36
Figura 12: Variograma teórico com azimute de 45° (escala trigonométrica) para o setor 1 da plataforma de Santos.	36
Figura 13: Variograma teórico com azimute de 135° (Escala Trigonométrica) para o setor 1 da plataforma continental de Santos	37
Figura 14: Mapa de batimétrico do Setor-1 da plataforma da bacia de Santos. Em (1) observa-se o ruído modelado no processo de interpolação geoestatística; em (2) os grandes domínios Morfosedimentares.	38
Figura 15: Mapas de batimetria bruta (A), regressão quadrática (B) e de resíduos (C) com as suas respectivas estatísticas para o setor 2 da plataforma de Santos.	40
Figura 16: Variogramas experimentais dos resíduos para o Setor-2 da área da plataforma de Santos.	41
Figura 17: Variograma experimental Omni-dimensional da plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance máximo de 21.000 metros.	41
Figura 18: Variograma teórico com direção de 45° para o Setor-2 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance médio de 16.000 metros.	42
Figura 19: Variograma teórico com direção de 135° para o Setor-2 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance médio de 16.000 m.	42
Figura 20 Mapa batimétrico resultante da interpolação por krigagem ordinária do Setor-2 da Plataforma de Santos. Em (1) observa-se o ruído modelado no processo de interpolação geoestatística; em (2) os grandes domínios Morfosedimentares. ...	43
Figura 21 Mapas de batimetria bruta (A), regressão quadrática (B) e de resíduos (C) com as suas respectivas estatísticas para o setor 3 da plataforma de Santos.	45

Figura 22: Variogramas experimentais para o setor 3 da plataforma de Santos.	46
Figura 23: Variograma experimental Omni-dimensional da plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance máximo de 19.500 metros.	46
Figura 24: Variograma teórico com direção de 30° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-3 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance médio de 19.500 m.	47
Figura 25: Mapa batimétrico resultante da interpolação por krigagem ordinária do Setor-3 da Plataforma de Santos. Em (1) observa-se o ruído modelado no processo de interpolação geoestatística; em (2) os grandes domínios Morfo-sedimentares; em (3) extrapolação da interpolação na porção continental em Ilha Grande - São Paulo.	48
Figura 26: Mapas de batimetria bruta (A), regressão quadrática (B) e de resíduos (C) com as suas respectivas estatísticas para o setor 4 da plataforma de Santos.	50
Figura 27: Variogramas experimentais para o setor 4 da plataforma de Santos.	51
Figura 28: Variograma experimental Omni-dimensional da plataforma de Santos para o setor 4, ajustado por um modelo gaussiano com alcance máximo de 44.000 metros.	51
Figura 29 Variograma teórico com direção de 30° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-4 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo gaussiano com alcance médio de 44.000 m.	52
Figura 30: Variograma teórico com direção de 120° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-4 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo gaussiano com alcance máximo de 44.000 m.	52
Figura 31: Mapa Batimétrico do Setor-4 resultante do processo de krigagem Em (1) observa-se o ruído modelado no processo de interpolação geoestatística; em (2) os grandes domínios Morfo-sedimentares.	53
Figura 32: Mapas de batimetria bruta (A), regressão quadrática (B) e de resíduos (C) com as suas respectivas estatísticas para o setor 5 da plataforma de Santos.	55
Figura 33: Variogramas experimentais para o setor 5 da plataforma de Santos.	56
Figura 34: Variograma experimental Omni-dimensional da plataforma de Santos para o setor 5, ajustado por um modelo esférico com alcance máximo de 20.000 metros.	56
Figura 35: Variograma teórico com direção de 0° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-4 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance máximo de 20.000 m.	57
Figura 36: Variograma teórico com direção de 0° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-4 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance máximo de 20.000 m.	57
Figura 37: Mapa Batimétrico do Setor-5 resultante do processo de krigagem Em (1) observa-se o ruído modelado no processo de interpolação geoestatística; em (2) os grandes domínios Morfo-sedimentares.	58
Figura 38: Mapa batimétrico da Plataforma de Santos resultante do processo de krigagem e posterior mosaicação.	59

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO	8
2.0	GEOLOGIA E ÁREA DE ESTUDO.....	10
3.0	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA MODELAGEM GEOESTATÍSTICA....	12
3.1	FUNÇÕES ALEATÓRIAS E ESTACIONARIDADE DO VARIOGRAMA E DA COVARIÂNCIA ESPACIAL	13
3.2	ANÁLISE ESTRUTURAL.....	17
3.2.1	DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS E TESTES DE NORMALIDADE	18
3.3	PROPRIEDADES DO VARIOGRAMA.....	18
3.4	ANISOTROPIA	20
3.5	KRIGAGEM	23
3.5.1	KRIGAGEM SIMPLES	24
3.5.2	KRIGAGEM ORDINÁRIA.....	25
4.	MATERIAIS E MÉTODOS - PROCESSAMENTO E MODELAGEM DOS DADOS DE BATIMETRIA.....	26
4.1	MATERIAIS	27
4.1.1	BASE DE DADOS	27
4.2	METODOLOGIA EMPREGADA NO TRABALHO.....	27
4.2.1	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS DE BATIMETRIA.....	27
4.2.3	ANÁLISE DE DENSIDADE AMOSTRAL DA BATIMETRIA.....	28
4.2.4	REMOÇÃO DE TENDÊNCIAS DAS AMOSTRAS DE BATIMETRIA .	30
4.2.5	DIVISÃO DA PLATAFORMA DA BACIA DE SANTOS EM SETORES	31
4.2.6	ANÁLISE VARIOGRÁFICA DA BATIMETRIA DA PLATAFORAMA DE SANTOS	32
4.2.6.1	ANALISE VARIOGRÁFICA DA BATIMETRIA DO SETOR 1	33
4.2.6.2	ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO SETOR 2.....	39
4.2.6.3	ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO SETOR 3.....	44
4.2.6.4	ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO SETOR 4.....	48
4.2.6.5	ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO SETOR 5	53
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
6.	FUTUROS DIRECIONAMENTOS DO TRABALHO	60
7.	BIBLIOGRAFIA	61

RESUMO

O presente trabalho trata da modelagem geoestatística de amostras de batimetria localizadas na plataforma continental da bacia de Santos, delimitada pelos altos de Cabo Frio ao norte e de Florianópolis ao sul, sendo que os limites de abrangência do trabalho se encontram entre as isóbatas de 10 e de 350 m.

A metodologia empregada neste trabalho teve como princípio modelar amostras de sondagens de batimetria adquiridas no Arquivo Técnico do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (CHM) e no BANPETRO utilizando a metodologia de modelagem geoestatística como princípio básico de abordagem deste trabalho.

Para a realização deste propósito os dados foram agrupados e integrados em uma única base de dados com um mesmo sistema de projeções (UTM - SAD-69 - Policônica). Após realizado este procedimento, foi realizada uma correção sobre a ocorrência de valores espúrios que apresentassem valores ou acima ou abaixo de uma determinada tendência em uma isóbata. Realizada esta etapa, a área de trabalho foi dividida em cinco setores onde as tendências das amostras foram removidas utilizando-se a metodologia da krigagem do resíduo. Finalizada esta etapa a batimetria foi obtida a partir da soma dos resíduos pela regressão quadrática de cada setor e posteriormente os cinco setores foram integrados em um mosaico e gerado o mapa de batimetria da plataforma continental de Santos.

Com relação aos resultados obtidos no trabalho, observa-se que a krigagem dos resíduos satisfaz o princípio de estacionaridade exigido pela modelagem geoestatística, porém este método também realça os erros intrínsecos ao levantamento.

PALAVRA CHAVE: Modelagem Geoestatística; Plataforma de Santos; Morfologia da Plataforma de Santos.

ABSTRACT

The present work deals with the geostatistical modeling of bathymetry samples located in the Continental Shelf of Santos Basin , enclosed by high Cabo Frio in the north and the high of Florianópolis in the north, with the limits of scope of work are between the isobaths of 10 and 350 m.

The methodology used in this work was beginning to model samples of bathymetric surveys acquired in Technical Archive Hydrographic Center Navy of Brazil (CHM) and BANPETRO using geostatistical modeling methodology as a basic principle of approach this work.

To realize this purpose the data were grouped and integrated into a single database with a single system of projections (UTM - DPS-69 - Polyconic). After performing this procedure, a correction on the occurrence of spurious values to present values or above or below a certain trend in a isobath was performed. Held this step, the work area was divided into five sectors where trends of the samples were removed using the methodology of the kriging residue. Completed this step bathymetry was obtained from the sum of the waste by quadratic regression of each industry and the five sectors were later integrated into a mosaic and generated the map bathymetry of the continental shelf Santos.

Regarding the obtained results, it is observed that the kriging waste satisfies the principle of stationarity required by geostatistical modeling, however this method also highlights the errors intrinsic to the survey.

KEYWORD: *Modelling Geostatistics; Platform Santos; Morphology in the Santos Platform.*

1.0 INTRODUÇÃO

O presente trabalho têm como objetivo principal fazer o tratamento de amostras de batimetria da plataforma continental de Santos entre as isóbatas de 10 e de 350 metros. Para o tratamento destas informações foi empregada à metodologia de modelagem geoestatística.

Neste contexto o trabalho teve ênfase em obter um modelo morfológico regional com resolução necessária para delimitar estes domínios, que por sua vez, são predominantemente indicadores de ambientes de sedimentação siliciclástica de alta, média e baixa energia bem como sedimentação carbonática.

2.0 GEOLOGIA E ÁREA DE ESTUDO

A Bacia de Santos se encontra delimitada pelos altos estruturais de Cabo Frio ao norte e o Alto de Florianópolis ao sul. Esta, se encontra delimitada entre as latitudes de 23° e 28° Sul e entre Longitudes de 48,5° e 42° Oeste, e abrange uma área de aproximadamente 350.000 km², onde se encontra delimitada na sua porção oeste pelas Serras do Mar e da Mantiqueira (Complexo Costeiro e de metassedimentos da faixa Ribeira) e na sua porção leste pelo Platô de São Paulo a partir do limite da cota batimétrica de 3.000 m (fig.1, MOREIRA et al., 2007).

A evolução tectono-sedimentar da bacia de Santos e das demais bacias da margem leste brasileira está relacionada ao processo de ruptura do megacontinente Gondwana, que levou à separação das placas Sul-Americana e Africana e, conseqüentemente, à criação do Oceano Atlântico Sul, (MOHRIAK, 2003).

Neste período, os eventos que mais influenciaram a morfologia e a cobertura sedimentar atual destes ambientes foi à regressão ocorrida no final do Pleistoceno Superior e o decorrente processo transgressivo já no Holoceno (KOWSMANN e COSTA, 1979,). Partindo deste princípio, diversos autores concentraram as suas investigações no estudo da geomorfologia, sedimentologia e estratigrafia destes ambientes, correlacionando estes parâmetros com as flutuações eustáticas (últimas glaciações) e a dinâmica sedimentar moderna, conforme observamos nos trabalhos de Kowsmann et al. (1977); Kowsmann e Costa (1979); Zemruscki, (1979); Côrrea, (1982); Dias et al. (1982); Brehme, (1984); , Ponzi et al. (1990); Côrrea (1996); Castaños, (2002); Artusi, (2004); Figueiredo Jr e Tessler, (2004); Figueiredo Jr e Madureira, (2004); Lopes (2004); Della Giustina, (2006); Simões (2007); Cetto (2009); Maya (2010); Pacheco (2011), dentre outros.

Na margem continental brasileira, o último evento regressivo, foi responsável pela exposição da plataforma a intensa erosão. Esta superfície plana foi dissecada por vales fluviais que depositavam seus sedimentos diretamente no talude (Kowsmann e Costa, 1979). Esta sedimentação também possibilitou o estabelecimento de um sistema regressivo progradante pleistocênico sotoposto aos depósitos biodetríticos. Estes, por sua vez, se formaram a partir do processo erosivo que se iniciou com a fase transgressiva subsequente que “canibalizou” a superfície pleistocênica, formando em algumas porções da plataforma depósitos de linha de praia (Kowsmann et al., 1978).

3.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA MODELAGEM GEOESTATÍSTICA

O método geoestatístico se utiliza de um conjunto de ferramentas estatísticas para determinar a distribuição espacial de um parâmetro (ex. recurso mineral, concentração de um poluente, cota altimétrica), tendo em vista resolver problemas de ordem de distribuição espacial e avaliação de medidas de incerteza (WOLF et al., 1994).

Esta técnica nasceu da necessidade de trabalhar com dados coletados em diferentes localizações espaciais, para os quais a abordagem da estatística clássica não conseguia responder a problemas como o grau de dispersão espacial ou a dependência

espacial entre medidas tomadas em diferentes locais (RIBEIRO JR., 1995; YAMAMOTO, 2001; SOARES 2006). Desse modo, seu corpo metodológico foi estruturado por meio de instrumentos estatísticos que quantificassem a continuidade espacial da grandeza em estudo por meio de uma função que calcula a variância espacial (variograma). Com base neste princípio, são utilizados modelos de interpolação espacial que fornecem o ferramental necessário para analisar a variabilidade estrutural de um fenômeno no espaço (krigagem). A partir dessa análise preliminar, é possível fazer o uso de modelos de simulação estocástica com o objetivo de gerar cenários, bem como quantificar as incertezas ligadas a fenômeno espacial a partir dos valores de variância da krigagem (YAMAMOTO, 2001; SOARES, 2006).

Segundo Soares (2006), de maneira geral, a incerteza ou o desconhecimento que temos do recurso natural nos impede na maioria das vezes de inferir com base em modelos físicos determinísticos o comportamento de um fenômeno em uma área a partir de amostras experimentais. Um exemplo deste comportamento descrito pelo autor é o caso de um aquífero subterrâneo ou de um reservatório petrolífero, onde o escoamento do fluido (água ou óleo) pode ser determinado por leis físicas precisas, como por exemplo, a lei de Darcy – que trata do escoamento de um fluido em meios porosos. Entretanto, estas características físicas perdem seu efeito quando o meio geológico é heterogêneo, impossibilitando a aplicação direta do modelo, dada a incerteza ligada à forma e às características petrofísicas das diferentes formações geológicas por onde circula o fluido.

3.1 FUNÇÕES ALEATÓRIAS E ESTACIONARIDADE DO VARIOGRAMA E DA COVARIÂNCIA ESPACIAL

Segundo Soares (2006), os fenômenos espaciais estruturados, tais como os recursos minerais, solos, aquíferos contaminados e recursos naturais de maneira geral, são entidades que se distribuem no espaço de modo não aleatório, apresentando uma determinada estrutura. Estes apresentam suas informações disponíveis em forma de amostras e observações que, na maioria das vezes, ocorrem de maneira parcial, discreta e normalmente escassa, o que faz com que seu conhecimento global esteja sempre associado a uma idéia de incerteza. Esta incerteza, imposta pelo número restrito de

informações e pelo caráter particular das informações espaciais, daria origem ao estudo das variáveis regionalizadas (Matheron, 1965 *apud* Soares 2006).

Nos modelos geoestatísticos, os dados amostrais são interpretados como sendo provenientes de um processo aleatório que apesar de apresentarem uma estrutura, esta necessita de um formalismo matemático que possibilite estimar as grandezas de uma variável, principalmente em áreas onde não existem amostras, tornando assim possível a quantificação desta incerteza a partir de uma distribuição de probabilidades. Sobre este aspecto, a modelagem geoestatística incorporaria o conceito de variável aleatória (VA) (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989; SOARES 2006).

Na análise Geoestatística, uma variável aleatória corresponde a um valor localizado espacialmente num ponto x_1 (denominação genérica de um conjunto de coordenadas geográficas). Este ponto é interpretado como uma realização particular de uma variável aleatória $Z(x_1)$, e o conjunto de variáveis aleatórias $Z(x_i), i = 1, \dots, N$, correlacionadas entre si, constituem uma função aleatória (FA) da qual se tem conhecimento de apenas uma realização $Z(x_i)$ do conjunto de dados experimentais (SOARES, 2006).

Como a determinação de qualquer parâmetro estatístico a partir de apenas uma amostra seria teoricamente impossível, a solução proposta pelo formalismo geoestatístico propõe que a variável aleatória assuma um grau de estacionaridade de segunda ordem, onde seriam considerados os dois primeiros momentos (média e variância), conforme observado na formalização matemática descrita nas funções 1.1 e 1.2 (REMACRE, 1999; SOARES, 2006).

$$E\{Z(x_i)\} = m(x_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} z dF_{x_i}(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} z f_{x_i}(z) dz \quad (1.1)$$

$$\text{var}\{Z(x_i)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} [Z - m(x_i)]^2 dF_{x_i}(Z), \quad (1.2)$$

Onde $f_{x_i}(Z)$ e $F_{x_i}(Z)$ correspondem às funções de densidade de probabilidade e de distribuição de probabilidade da variável $Z(x_i)$, respectivamente.

Esta definição assume que a esperança da realização de uma função aleatória ($E\{Z(x_1)\}$) é constante e igual a sua média aritmética (m), bem como a sua realização não dependeria do ponto (x_1) (REMACRE, 1999).

Segundo Soares (2006), esta hipótese de estacionaridade da média constitui parte integrante e fundamental do modelo probabilístico geoestatístico. No sentido de aplicação, este parâmetro não poderia ser nem validado, nem refutado, uma vez que, na prática, existe apenas uma realização da função aleatória. Entretanto, esta afirmativa deve ser julgada se apropriada, ou não, para o universo amostral a ser analisado. Desse modo, afirmar que a estacionaridade de um conjunto de amostras se encontra centrada na sua média, corresponderia em afirmar que os valores das amostras são suficientemente homogêneos para validar esta representatividade.

Segundo Soares (2006), outra premissa exigida pela modelagem geoestatística se encontra vinculada ao entendimento de como duas variáveis aleatórias variam conjuntamente, ou seja, a sua covariância.

A covariância ($C(h)$) de duas variáveis aleatórias, $Z(x_1)$ e $Z(x_2)$, pode ser definida partir da diferença entre o produto da esperança de um par de realizações de variáveis aleatórias e o quadrado de sua média conforme observado na função 1.3 (Soares, 2006).

$$C(Z(x_1), Z(x_2)) = E\{Z(x_1) Z(x_2)\} - m(x_1)m(x_2) \quad (1.3)$$

A hipótese de estacionaridade é então definida a partir da correlação entre duas variáveis aleatórias (função 1.3). Esta correlação depende apenas do vetor de distância espacial (h) que separa as variáveis aleatórias. Assim, esta correlação é representada a partir das funções de variograma ($\gamma(h)$) (função 1.5) e de covariância ($C(h)$) (função 1.6), respectivamente (SOARES, 2006).

$$\begin{aligned} \gamma(Z(x_1), Z(x_2)) &= \gamma(Z(x_1), Z(x_1 + h)) = \gamma(h) \\ \gamma(Z(x_1), Z(x_2)) &= E\{[Z(x_1) - Z(x_2)]^2\} = \gamma(h) \quad (1.5) \end{aligned}$$

onde $(h) = x_2 - x_1, x_2 = x_1 + h$;

$$C(Z(x_1), Z(x_2)) = C(Z(x_1), Z(x_1 + h)) = C(h) \quad (1.6)$$

O variograma (1.5) e a covariância (1.6) são as medidas médias de correlação entre duas variáveis aleatórias dependentes estritamente pela sua distância espacial

(vetor \mathbf{h}) e independento, assim, da sua posição (\mathbf{x}_1). Da mesma forma que a média responde à hipótese de estacionaridade na realização de uma variável aleatória, as funções variograma e covariância responderiam à hipótese de estacionaridade de duas variáveis aleatórias correlacionadas no espaço (SOARES, 2006).

A função variograma ou semivariograma $\gamma(h)$ (função 1.5) corresponde a uma medida da variância das diferenças entre dois pontos x_1 e x_2 , separados por uma distância h , os pontos próximos entre si apresentariam uma variância pequena que cresce na medida em que a distância aumenta. Já a função de covariância ou covariograma $C(h)$ se comportaria de forma inversa – onde as distâncias são pequenas existe uma alta covariância, enquanto que em grandes distâncias a covariância é baixa (YAMAMOTO, 2001). As representações matemáticas das funções de variograma e covariograma empregadas em termos computacionais podem ser observadas nas funções 1.7 e 1.8, bem como a sua representação gráfica (Fig. 2) (YAMAMOTO, 2001; SOARES, 2006).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_{\alpha}) - Z(x_{\alpha} + h)]^2, (1.7)$$

$$C(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_{\alpha})Z(x_{\alpha} + h) - m(x_{\alpha})m(x_{\alpha} + h)], (1.8)$$

$$\text{Sendo } m(x_{\alpha}) = 1/N(h) \sum_{\alpha=1}^{N(h)} Z(x_{\alpha}) \text{ e } (x_{\alpha} + h) = 1/N(h) \sum_{\alpha=1}^{N(h)} Z(x_{\alpha+h})$$

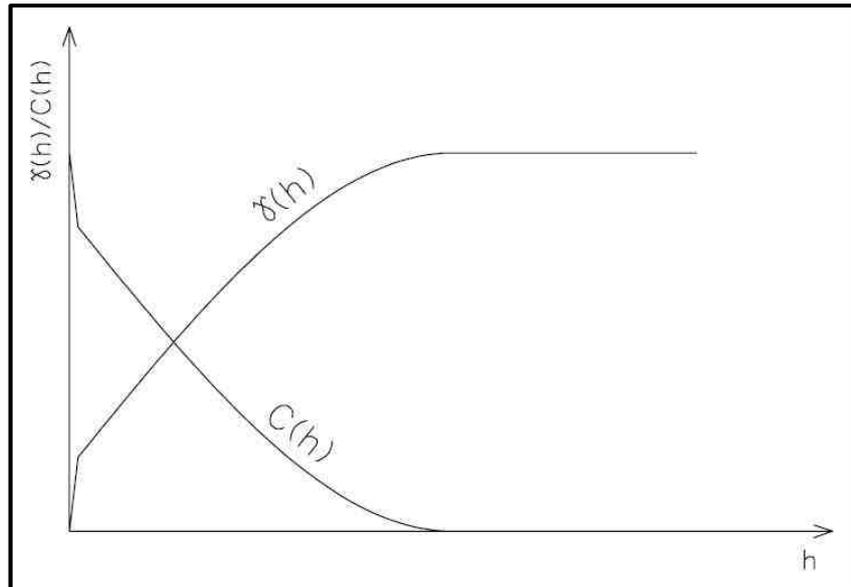


Figura 2: Relação entre as funções variograma $\gamma(\mathbf{h})$ e covariograma $C(\mathbf{h})$ segundo Yamamoto (2001).

3.2 ANÁLISE ESTRUTURAL

Terminada esta breve introdução dos princípios matemáticos empregados pela modelagem geostatística, este subitem abordará do modo tratamento das amostras que serão modeladas a partir da metodologia geostatística. Esta fase de tratamento inicial dos dados recebe a denominação de análise estrutural e cujo objetivo consiste na: Identificação de possíveis valores externos (outliers) e tendências e na detecção da existência de diferentes populações 4.2

A primeira etapa da análise estrutural consiste em fazer uma estatística descritiva do universo amostral, tendo como principal objetivo caracterizar e descrever estatisticamente o comportamento das variáveis de interesse (YAMAMOTO, 2001). Esta descrição deve ser realizada a partir das medidas dos seus momentos estatísticos e as estatísticas que descrevam o grau de dispersão de um conjunto de amostras, tais como: (1) média; (2) mediana; (3) moda; (4) variância; (5) desvio padrão; (6) coeficiente de variação; (7) assimetria; (8) curtose; (9) máximo; (10) mínimo; (11) amplitude e (12) percentis.

3.2.1 DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS E TESTES DE NORMALIDADE

Segundo Yamamoto (2001), a análise estatística se inicia a partir do estudo de distribuição de frequências, cujo propósito consiste em descrever o modo como as unidades de uma população estão distribuídas sobre um intervalo amostrado. Neste contexto, o uso de ferramentas como o histograma e o gráfico de distribuição acumulativa possibilitou analisar uma quantidade significativa de informações de forma rápida a partir da sua representação gráfica.

O emprego deste tipo de teste na modelagem geoestatística é importante no sentido de qualificar o conjunto de amostras, de modo a garantir que estas sigam o princípio de estacionaridade ou de normalidade discutido no subitem 4.2, possibilitando, desta forma, validar ou refutar a modelagem de um conjunto de amostras.

Segundo Yamamoto (2001), as funções obtidas a partir das distribuições acumuladas de maneira geral são empíricas e, por consequência, as suas propriedades matemáticas são desconhecidas, sendo assim necessário aproximar as distribuições de frequências, obtidas a partir de funções de distribuições teóricas, sendo as mais conhecidas à distribuição normal e a lognormal.

Em suma o teste de normalidade é empregado no sentido de validar uma distribuição amostral para uma posterior modelagem do variograma bem como detectar se a amostra apresenta algum tipo de tendências.

3.3 PROPRIEDADES DO VARIOGRAMA

Após a análise realizada a partir da estatística descritiva onde são testadas as condições de estacionaridade de um conjunto de amostras, segue-se para uma segunda fase de tratamento dos dados que consiste em modelar numericamente a continuidade espacial das variáveis regionalizadas. Este processo é realizado por meio de um semivariograma experimental (Fig. 3) cujas principais características são descritas segundo Yamamoto, (2001):

Amplitude: Corresponde à distância de limite entre a correlação estruturada e o campo aleatório. Neste sentido, quanto maior for a amplitude de um conjunto de amostras, maior será a sua homogeneidade;

Patamar: Corresponde ao valor onde a variância espacial se estabiliza;

Efeito Pepita: É o valor da função variograma em sua origem ($h=0$). Em amostras modeladas, este valor geralmente é maior que zero ($h>0$), tendo esta diferença atribuída a erros de amostragem que foram incorporados. O efeito pepita também recebe a denominação de variância aleatória (Fig. 3);

Variância espacial: Esta medida observada no eixo da ordenadas (figura 3) corresponde ao campo que apresenta a correlação espacial possível de ser modelada. Esta é classificada pela a diferença entre a variância a priori e o efeito pepita.

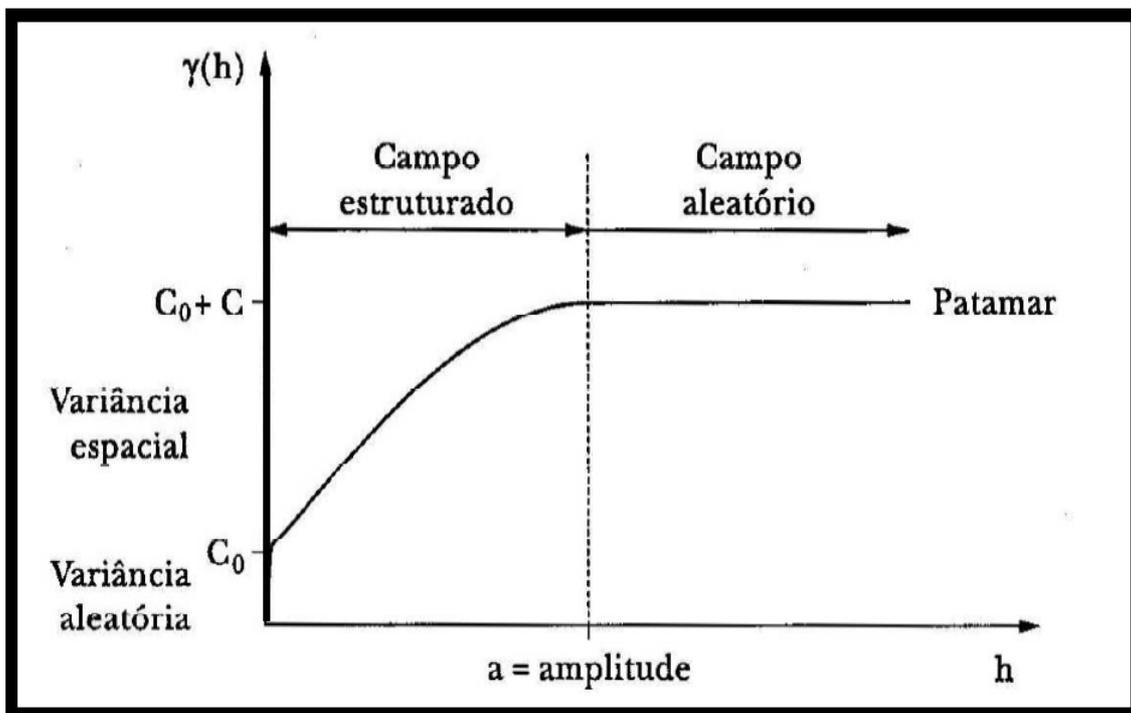


Figura 3: Gráfico de um semivariograma teórico onde se observam seus principais elementos como: o **efeito pepita** em (C_0), a **variância espacial** dentro do campo estruturado ($C_0 + C$), o limite de alcance da **amplitude** (a) do campo estruturado, representado no eixo da abscissa (distância) e o **campo aleatório** do variograma (YAMAMOTO, 2001).

3.4 ANISOTROPIA

A anisotropia é um fenômeno no qual se observa o comportamento da variância espacial, quando esta é orientada em diferentes direções do espaço. Esta característica é observada a partir do comportamento variado do variograma quando modelado em diferentes direções. A modelagem das estruturas anisotrópicas tem como principal objetivo reduzir a continuidade de suas diferentes direções a um modelo único (SOARES, 2006).

O procedimento de modelagem das estruturas anisotrópicas consiste em mapear diferentes variogramas em várias direções, a fim de analisar o comportamento da variável regionalizada por meio de um diagrama que mede os parâmetros de um variograma (direção do variograma; tolerância angular; tamanho do passo ou lag distance; tolerância do passo e largura da banda), tendo como principal objetivo transformar estes vários variogramas em um modelo com estruturas isotrópicas (MONTEIRO, 2003; SOARES, 2006). A estrutura deste diagrama pode ser observada na figura 4, sendo que a descrição dos seus parâmetros foi baseada em Monteiro, (2003) e Yamamoto, (2001).

A direção do variograma (Fig. 4) representa a direção dos pares de pontos que são utilizados para o cálculo do variograma em uma malha irregular. Nesta se admite uma tolerância angular dos pares de pontos limitados por uma distância percorrida, que quando estabelecida forma um triângulo (2D) ou um cone (3D) em torno da direção preferencial.

O tamanho do passo (Fig. 4) corresponde à distância entre os pontos para a definição dos pares que terão sua semivariância calculada. Para este cálculo também é necessário o estabelecimento de uma tolerância a fim de que não ocorra a perda de pontos. A largura de banda é uma distância que é utilizada para restringir o número de pontos a serem pareados.

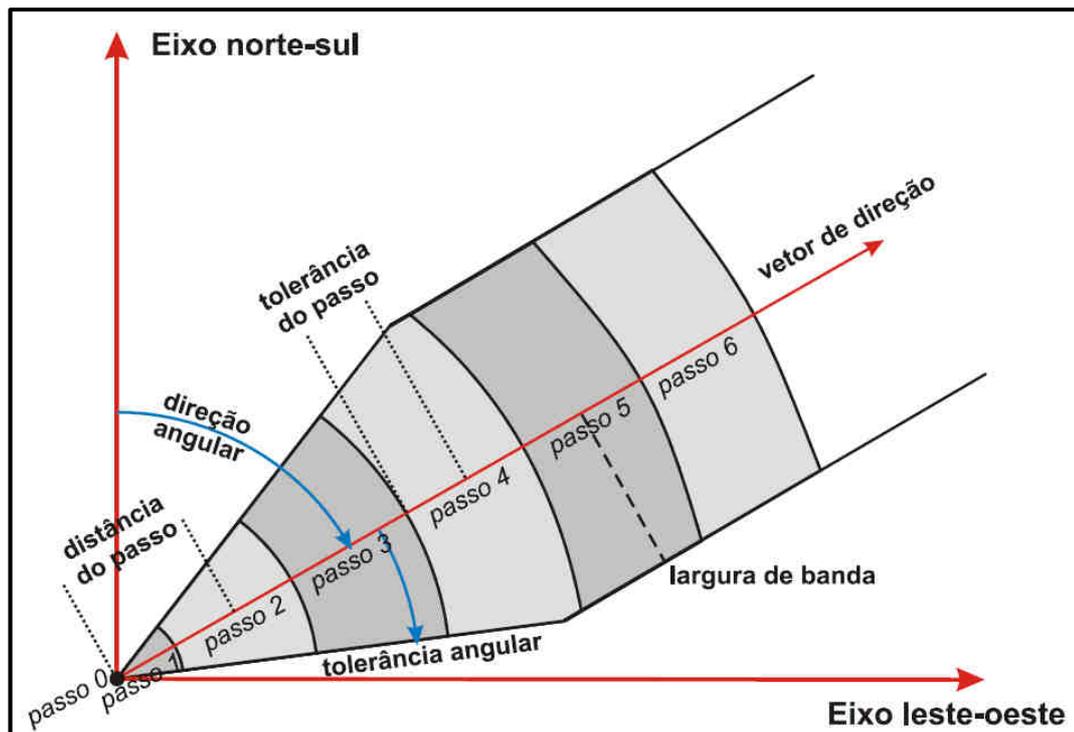


Figura 4: Diagrama direcional exibindo os parâmetros de um variograma segundo Monteiro (2003).

4.4.1 MODELOS TEÓRICOS DE VARIOGRAMAS

Segundo Yamamoto, (2001) o variograma é a ferramenta básica de cálculo dos valores da função variograma para uma determinada distância, constituindo assim em um pré-requisito necessário para a organização do sistema de equações de krigagem.

Na modelagem por variografia são utilizadas três estruturas de análise ou três tipos de variograma. O primeiro consiste no variograma experimental, o qual é gerado a partir do conjunto de dados disponíveis das variáveis locais, constituindo assim a única realização conhecida. O segundo é o variograma verdadeiro, que representa toda a população estudada, porém possui uma realização matemática desconhecida. O terceiro é o variograma teórico ou modelo variográfico (conjunto de modelos), que é ajustado ao variograma experimental de forma interativa por meio dos seus parâmetros (YAMAMOTO, 2001; GUIMARÃES, 2002; MONTEIRO, 2003).

A partir deste contexto, o objetivo principal da análise variográfica (estudo estrutural) consiste em ajustar um variograma teórico ao variograma experimental, de modo que, a partir de um variograma matematicamente conhecido, possam ser realizadas inferências em relação ao variograma real (ISAACS E SRIVASTAVA, 1989).

Segundo Guimarães (2002), existem dois grupos de variogramas teóricos: os que atingem um patamar e são coerentes com a hipótese de estacionaridade de segunda ordem, e os que não têm patamar. A seguir, são apresentados os modelos Gaussiano, Esférico, Exponencial e de Pepita Puro. Estes são os principais modelos que atingem patamar e cobrem a maioria das situações de dispersão de fenômenos espaciais em ciências da Terra e do ambiente (GUIMARÃES, 2002; SOARES, 2006).

Os modelos com patamar foram baseados em Guimarães, (2002) e Soares (2006), sendo representados na figura 10:

Gaussiano: Este modelo (Fig. 10-A) é utilizado em fenômenos bastante regulares, possuindo crescimento relativamente rápido junto à origem. Este modelo apresenta comportamento parabólico, apresentando uma amplitude a que corresponde à distância para a qual o modelo atinge 95% do patamar: $\gamma(a) = 0.95C$

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right] = C \left[1 - \exp\left(\frac{-3h^2}{A^2}\right) \right] \quad (2.1)$$

Esférico: Corresponde a um dos modelos mais utilizados em geoestatística (Fig. 10-B), e se apresenta em função de dois parâmetros: O patamar (C), - limite superior para o qual tendem os valores do variograma com aumento dos valores de h , e a amplitude de $h = a$, - distância para a qual os valores de $\gamma(h)$ param de crescer igualando-se a um patamar que normalmente coincide com a variância de $Z(x)$. A amplitude por sua vez mede os valores de $Z(x)$ que deixam de estar correlacionados.

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \cdot \left[\frac{3|h|}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right] & |h| \leq a \\ c & |h| > a \end{cases} \quad (2.2)$$

Exponencial: Apresenta características semelhantes ao do modelo esférico (amplitude e patamar), tendo seu patamar tendendo assintoticamente. Neste modelo (Fig. 10-B), o valor da amplitude a corresponde à distância em que o modelo atinge 95% do patamar: $\gamma(a) = 0.95C$.

$$\gamma(h) = C \left[1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right] \quad (2.3)$$

Efeito Pepita: Corresponde a um fenômeno puramente aleatório, que não apresenta correlação com seus vizinhos (Fig. 10-D).

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{se } h = 0; \\ 1 & \text{se } h > 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

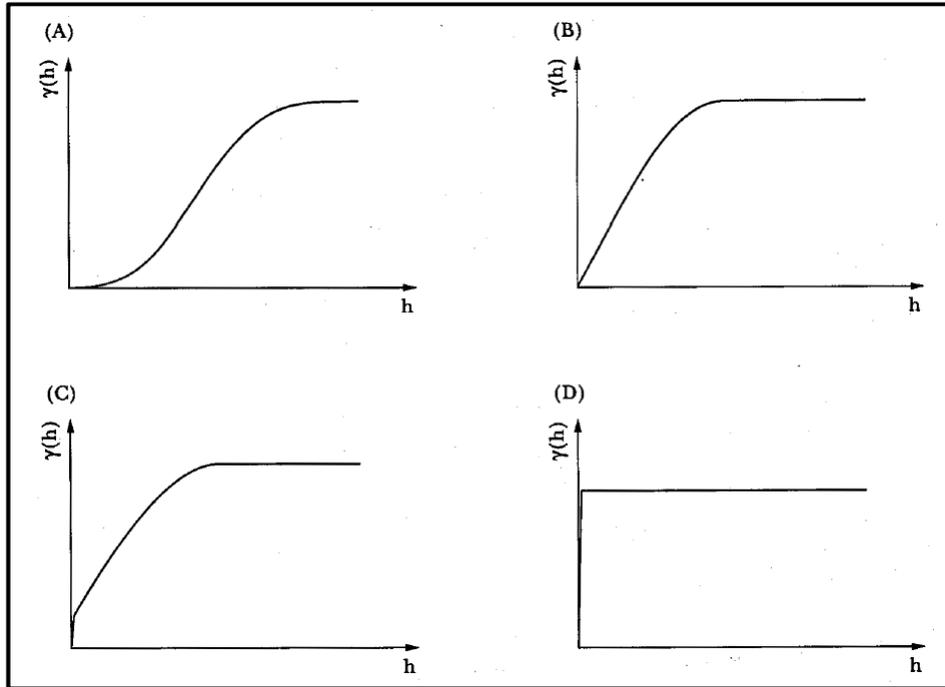


Figura 5: Modelos de experimentais de variograma: (A) modelo gaussiano; (B) modelo esférico e/ou exponencial; (C) modelo esférico e/ou exponencial, com efeito, pepita; (D) efeito pepita puro, segundo Guimarães (2002).

3.5 KRIGAGEM

Segundo Yamamoto (2001), a krigagem consiste no processo final dos estudos geoestatísticos, cujo resultado final de análise pode até indicar a não-aplicação desse método-, se o comportamento da variável regionalizada for totalmente aleatório. Ainda, segundo o referido autor, a definição de um modelo de variograma é empregado de modo a inferir os valores da função variograma ou covariograma, que serão utilizados no método de interpolação geoestatístico (krigagem).

Desse modo, a krigagem corresponde a um método que usa um estimador linear geoestatístico (função 2.5), que permite estimar um valor não amostrado $Z^*(x_0)$,

associando a um ponto, área ou volume por meio de um conjunto de N variáveis vizinhas $x_0 - Z(x_0), \alpha = 1, \dots, N$ (Yamamoto, 2001). A sua função principal cumpre dois critérios importantes que são: não-enviesamento e mínima variância da estimação (Soares, 2006).

$$[Z(x_0)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha}) \quad (2.5)$$

Onde λ_{α} é o ponderador da amostra $Z^*(x_{\alpha})$

A krigagem consiste em um conjunto de técnicas de regressão linear generalizadas para minimizar a variância do erro de estimação empregado a partir de um modelo covariância predefinido (GUIMARÃES, 2002). Dentre estas técnicas de regressão de uso comum, destacam-se: (1) a krigagem simples, onde o fenômeno é estacionário e a média são conhecidos; (2) a krigagem ordinária, onde o fenômeno é estacionário ou quase-estacionário e a média é desconhecido; e (3) a krigagem indicativa (indicatriz), em que ocorrem superfícies de corte sobre dados binários, (MONTEIRO, 2003).

3.5.1 KRIGAGEM SIMPLES

A Krigagem Simples consiste ao método de interpolação que se baseia no conhecimento das médias do conjunto de variáveis aleatórias (valores amostrados) e dos pontos no espaço não amostrados. Desse modo, para que o cálculo dos ponderadores (λ_{α}) seja realizado, deve-se assumir como premissa que a função aleatória é estacionária do primeiro momento para todas as variáveis aleatórias $E\{Z(x_{\alpha})\} = E\{Z(x_0)\} = m$ (2.6) (Soares, 2006).

Segundo Soares, (2006), ao admitirmos a hipótese de estacionaridade da média $m(x_{\alpha}) = m, \alpha = 1, \dots, N$ onde esta é conhecida e se comporta como uma constante, a sua versão estacionária de krigagem seria descrita por:

$$\begin{aligned}
[Z(x_0)]^* &= m + \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} [Z(x_{\alpha}) - m] \\
&= \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha}) + [1 - \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha}] m \quad (2.7)
\end{aligned}$$

Dentre as características da krigagem simples se observa que este interpolador tende a atenuar os valores estimados em torno da média conhecida m (SOARES, 2006). Segundo o mencionado autor, a krigagem ordinária e a krigagem simples, se diferenciam de modo que a primeira reproduz melhor as médias locais, enquanto que a segunda é utilizada quando se pretende impor uma média global para os valores estimados.

3.5.2. KRIGAGEM ORDINÁRIA

A krigagem Ordinária se diferencia da Krigagem Simples no sentido de que o conhecimento prévio da média não precisa ser satisfeito. Dessa forma, a média local é calculada a partir da sua vizinhança. Nesta situação, a soma dos ponderadores não tendenciosos seria unitária (função 2.8) e o seu estimador de Krigagem calculado a partir do estimador da função 2.5 (GUIMARÃES, 2002).

$$\sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} = 1. \quad (2.8)$$

Os pesos seriam calculados a partir do sistema linear do item 6.9 (Felgueiras 1999 apud Guimarães, 2002):

$$\sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} (x_0) \cdot C(x_{\alpha}, x_{\beta}) - \mu(x_0) = C(x_0, x_{\alpha}) \quad (2.9)$$

$$\alpha = 1, 2, \dots, N (x_{\alpha}) \text{ e } \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} = 1.$$

Onde: $C(x_{\alpha}, x_{\beta})$ é a covariância entre as amostras x_{α} e x_{β} ; $C(x_0, x_{\alpha})$ é a covariância entre os valores de $Z(x_{\alpha})$ observados em x_{α} e $\mu(x_0)$; $\mu(x_0)$ corresponde ao multiplicador de Lagrange, que é utilizado para a minimização do erro associado a restrição de $\sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} = 1$ (Felgueiras, 1999 apud Guimarães, 2002).

A krigagem ordinária é expressa em termos matriciais a partir do item 3.0, onde K é a matriz covariância entre as amostras; M corresponderia à matriz de covariância entre amostras e o ponto a estimar; e λ é a matriz dos ponderadores.

$$[K] = \begin{bmatrix} C(x_1, x_1) & C(x_1, x_2) & \cdots & C(x_1, x_N) & 1 \\ C(x_2, x_1) & C(x_2, x_2) & \cdots & C(x_2, x_N) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C(x_N, x_1) & C(x_N, x_2) & \cdots & C(x_N, x_N) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.0)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} C(x_1, x_0) \\ C(x_2, x_0) \\ \vdots \\ C(x_N, x_0) \\ 1 \end{bmatrix}; \quad [\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix}$$

Assim o sistema de krigagem é expresso sob a sua forma matemática: $[K] \cdot [\lambda] = [M]$ (3.1), cuja solução de sua matriz inversa seria: $[\lambda] = [K]^{-1} \cdot [M]$ (3.2) (Guimarães, 2002).

Soares (2006) destaca dois aspectos relevantes no processo de interpolação por krigagem ordinária:

O primeiro está associado ao fator de distância estrutural ($[M]$ da matriz inversa 3.2) das amostras e o ponto a estimar. Neste sentido, quanto mais próximas as amostras estiverem do ponto a estimar, maior será o peso do estimador.

O segundo aspecto está relacionado ao fator de desagregação (declustering) originado pela matriz de covariância ($[K]^{-1}$, matriz inversa 3.2); nesta situação, quanto mais correlacionadas estiverem às amostras, maior será seu efeito de agrupamento e por consequência, menor será seu peso individual na construção do estimador.

4. MATERIAIS E MÉTODOS - PROCESSAMENTO E MODELAGEM DOS DADOS DE BATIMETRIA

Neste capítulo são apresentados os principais procedimentos empregados no tratamento dos dados de batimetria que envolvem a análise exploratória realizada a partir da estatística descritiva dos dados da análise e extração de tendências, a krigagem e a geração do modelo da batimetria da plataforma continental de Santos.

4.1 MATERIAIS

Os softwares utilizados para o tratamento das bases de dados, modelagem geoestatística, geração de gráficos e planilhas foram respectivamente os aplicativos ArcGis, Sgems, Surfer, Grapher e Excel.

4.1.1 BASE DE DADOS

A base de dados empregada neste trabalho consiste no agrupamento de 147 folhas de bordo adquiridas no Arquivo Técnico do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (CHM), no BANPETRO e registros digitalizados ao largo de Ilha Grande e Cananéia gentilmente cedidos por Conti et al., (2006, tabela 1), totalizando aproximadamente 820.000 registros.

4.2 METODOLOGIA EMPREGADA NO TRABALHO

4.2.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS DE BATIMETRIA.

Com o objetivo de integrar as informações de batimetria da plataforma de Santos foi utilizado o sistema de informações geográfica (SIG) ArcGis, com o datum de referência: Projeção Policônica SAD 69 para todos os atributos espaciais. Este sistema foi adotado com o objetivo de integrar as zonas UTM de 23o e 24o sul em um único projeto. Deste modo todas as folhas de bordo de batimetria em meio digital foram transformadas para a projeção Policônica SAD 69 (Tabela 1).

Tabela 1: Relação de Folhas de bordo utilizadas para a geração da morfologia da plataforma de Santos.

1500-001-79	1600-004-77	1632-008-77	1641-002-81	1700-010-1A	1823-003-92
1500-002-79	1600-004-92	1633-001-78	1641-003-81	1700-011-81	1824-003-98
1500-002-84	1600-004-97	1633-001-79	1642-001-84	1700-013-81	1824-006-98
1500-003-86	1600-005-97	1633-001-81	1642-002-84	1700-014-81	1824-007-98
1500-003-87	1600-006-97	1633-001-86	1653-001-80	1700-014-1B	1824-007-98
1500-004-87	1600-007-97	1633-002-86	1700-001-78	1700-015-81	1824-008-98
1500-004-88	1600-008-97	1633-003-86	1700-001-81	1701-001-94	1824-009-98
1500-004-89	1600-009-97	1633-004-86	1700-001-82	1701-002-94	2126-007-114-56
1500-006-86	1600-010-97	1633-005-86	1700-002-78	1701-003-94	2126-001-02
1503-001-85	1601-002-81	1633-006-86	1700-002-81	1701-004-94	2126-001-98
1503-002-85	1601-002-81	1633-007-86	1700-002-82	1800-001-60	2126-001-99
1505-002-85	1607-001-78	1633-008-86	1700-002-99	1800-001-72	2126-002-02
1505-003-85	1620-001-79	1633-009-86	1700-003-81	1800-001-88	2126-002-98
1505-004-85	1620-002-79	1633-010-86	1700-003-82	1800-002-60	2126-002-98B
1600-001-79	1622-001-81	1635-001-80	1700-003-99	1800-003-72	2126-003-99
1600-001-90	1623-005-81	1635-002-80	1700-004-81	1804-001-85	2126-007-114-56-991
1600-001-97	1630-001-92	1635-002-81	1700-004-82	1804-001-94	2125-001-02
1600-002-81	1632-002-85	1635-003-80	1700-004-99	1804-001-95	*Conti <i>et al.</i> , (2006)
1600-002-90A	1632-002-89	1635-003-81	1700-005-81	1804-001-96	
1600-002-92	1632-003-78	1635-004-80	1700-005-82	1804-002-81	
1600-002-97	1632-003-85	1635-004-81	1700-005-99	1804-005-95	
1600-003-70	1632-003-89	1636-001-97	1700-006-81	1804-006-95	
1600-003-77	1632-003-89	1640-001-79	1700-006-82	1804-007-95	
1600-003-90A	1632-004-85	1641-001-81	1700-007-81	1820-002-79	
1600-003-92	1632-005-77	1641-001-82	1700-008-81	1820-003-79	
1600-003-97	1632-007-77	1641-001-85	1700-009-81	1821-001-87	

* Incluídos fragmentos de registros de folhas de bordo gentilmente cedidas por Conti *et al.*, (2006) que abrangem o trecho entre Ilha Grande e Cananéia.

4.2.3 ANÁLISE DE DENSIDADE AMOSTRAL DA BATIMETRIA

Após integração das amostras em um único Datum, foi gerado um mapa de densidade de amostral da plataforma de Santos (Fig. 5). Este mapa foi gerado com o objetivo de observar a variação amostral ao longo de toda a área de estudo, utilizando como parâmetro de medida um raio de busca de 1000 m, podendo assim agrupar classe similares de densidade de distribuição amostral. O mapa de densidade de pontos (Fig. 5) foi interpretado a partir do quociente do número de pontos pelo raio de busca que, neste caso, corresponde a 1.000 metros.

Conforme observado no mapa (figura 6) observa-se que as maiores densidades estão entre as isóbatas de 10 e 50 metros sendo que as maiores frequências relativas (quase 30% das amostras, fig.7) apresentam pelo menos um ponto a cada 1000 m. Os valores inferiores a um, ocorrem por conta que alguns pontos se encontram entre o limite do raio de busca sendo considerados neste trabalho como pelo menos um ponto no raio de busca definido para geração do mapa de densidade amostral. No mapa da figura 6, as menores densidades ocorrem na plataforma externa em direção a sua quebra.

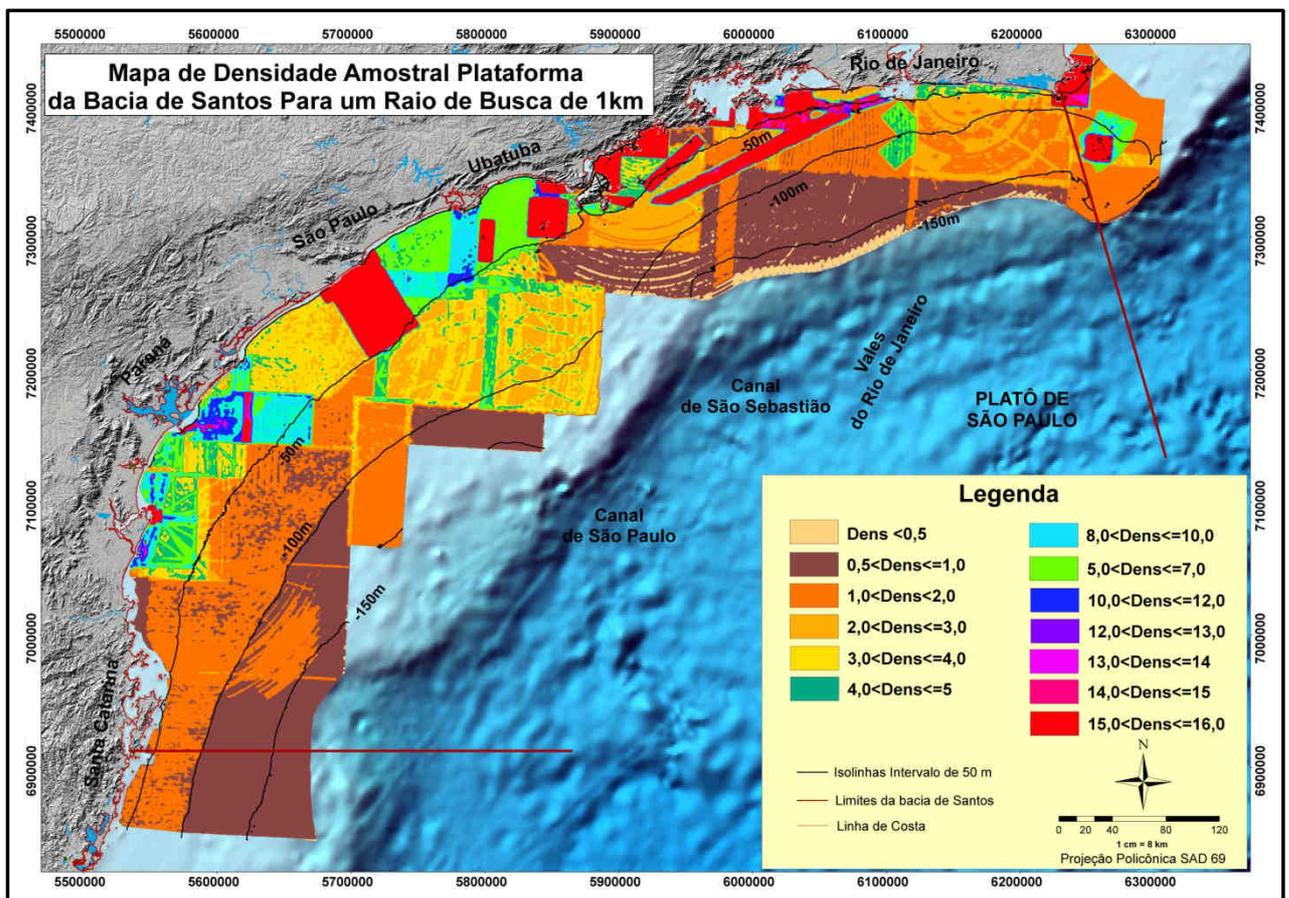


Figura 6: Mapa de densidade amostral para um raio de busca de 1000 m.

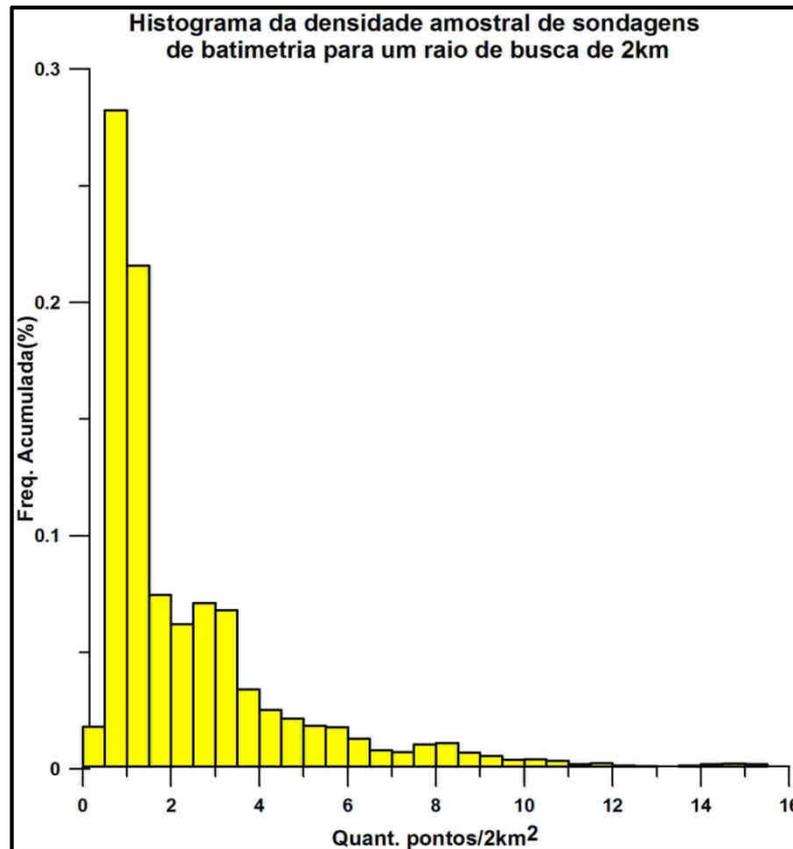


Figura 7: Densidade amostral da batimetria para a área de abrangência da plataforma continental de Santos.

4.2.4 REMOÇÃO DE TENDÊNCIAS DAS AMOSTRAS DE BATIMETRIA

Na modelagem geoestatística a hipótese intrínseca onde a variável aleatória deve variar em torno de uma média deve ser satisfeita (SOARES, 2006; REMACRE, 1999). Uma das maneiras mais práticas de resolver esta questão em dados morfométricos consiste em subtrair dos dados originais uma função ajustada por mínimos quadrados, trabalhando com a função residual resultante. Assim a função residual ou variável geológica $F_{res}(x, y)$ é interpretada como sendo uma componente da realização de uma variável aleatória $Z(x, y)$. Esta função, pode ser interpretada como sendo a diferença entre a variável aleatória $Z(x, y)$ e a função tendência $Z^*(x, y)$ onde a função tendência pode ser uma regressão linear (a) $Z^*(x, y) = A_0 + A_1X + A_2Y$ ou quadrática (2) $Z^*(x, y) = A_0 + A_1X + A_2Y + A_3XY + A_4X^2 + A_5Y^2$ (DUBRULE, 2003; VIEIRA et al, 2010).

$$F_{res}(x, y) = Z(x, y) - Z^*(x, y) \quad (5.0)$$

Na batimetria esta tendência ocorre pelo aprofundamento da lâmina d'água em direção ao oceano profundo. Depois de detectada esta tendência da batimetria foi necessário selecionar a função de regressão que melhor se ajuste ao dado de batimétrico. Ao observar o controle morfológico da plataforma continental de Santos optou-se por adotar uma função de regressão quadrática, devido às características parabólicas da plataforma de Santos (fig. 8).

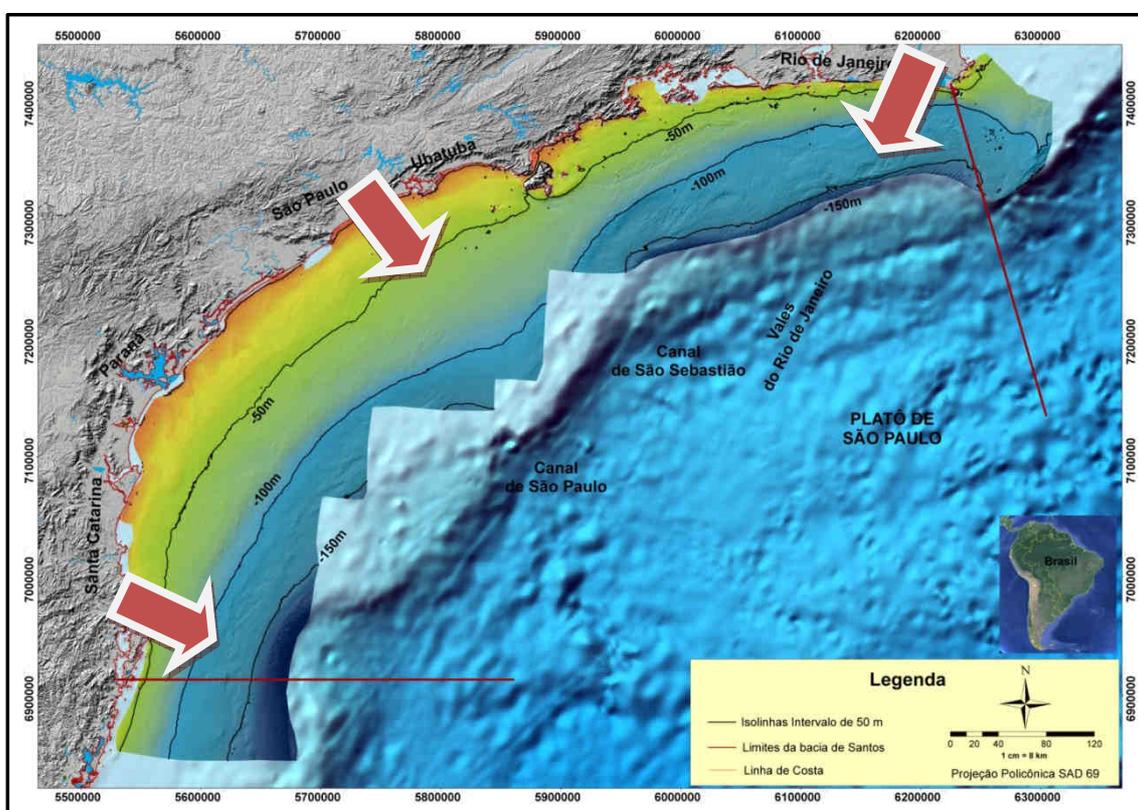


Figura 8: Superfície de tendências da batimetria da plataforma de Santos evidenciando uma tendência parabólica em direção à quebra da plataforma para as amostras de batimetria.

4.2.5 DIVISÃO DA PLATAFORMA DA BACIA DE SANTOS EM SETORES

A divisão dos setores da plataforma da bacia de Santos teve como objetivo principal facilitar o processamento na geração dos variogramas e auxiliar no processo de

krigagem. Outro propósito para divisão de setores na plataforma também esteve relacionado com a delimitação de ruídos provenientes da geometria de aquisição e outros possíveis ruídos oriundos do tratamento e processamento na fase de aquisição das folhas de bordo. Assim a plataforma continental de Santos foi dividida em cinco setores, sendo o primeiro: Setor 1 se encontra localizado ao largo do estado de Santa Catarina, o Setor 2 abrange os estados do Paraná e de São Paulo e os Setores 3, 4 e 5 se encontram localizados entre os estados de São Paulo e do Rio de Janeiro.

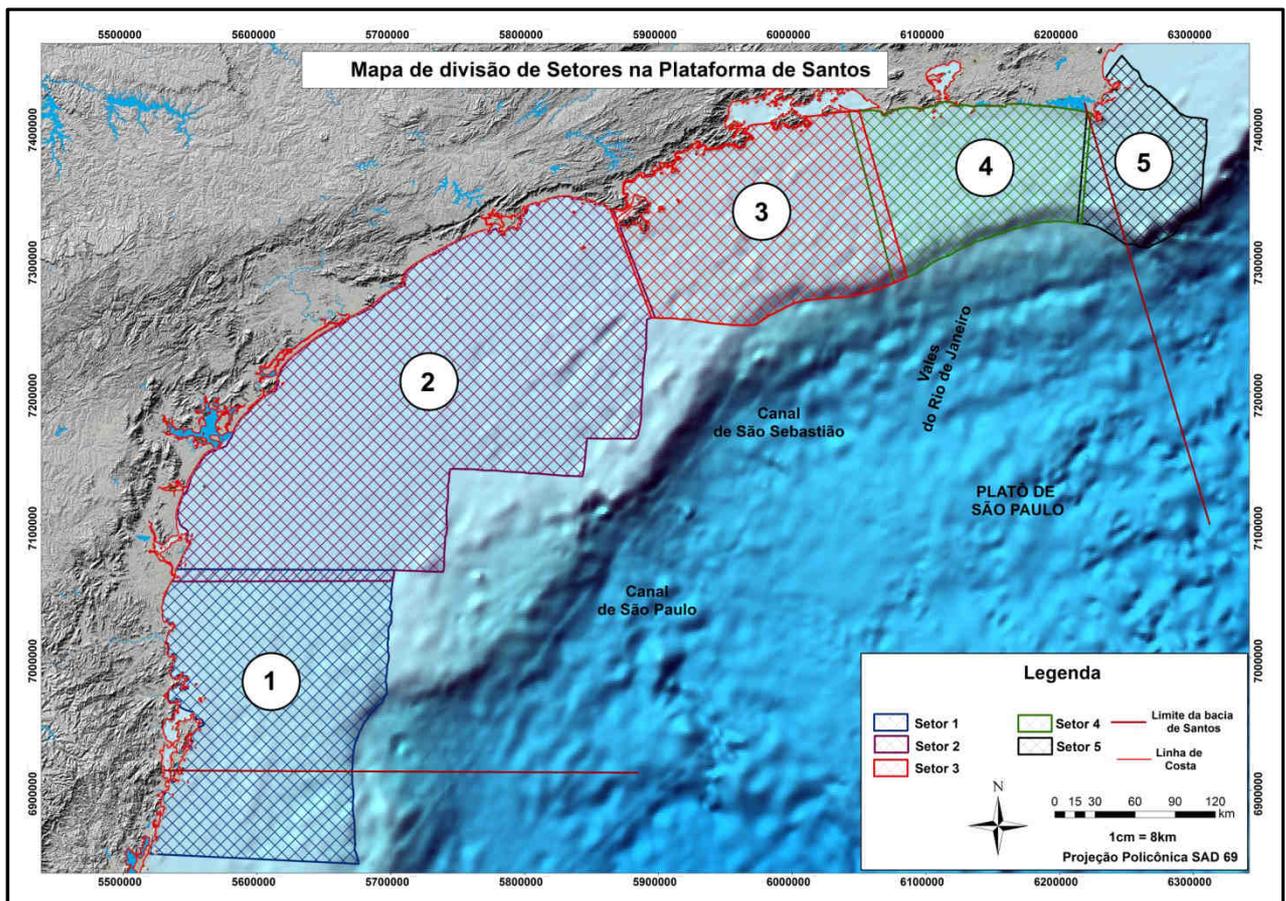


Figura 7: Mapa de divisão de setores para a plataforma continental de Santos.

4.2.6 ANÁLISE VARIOGRÁFICA DA BATIMETRIA DA PLATAFORMA DE SANTOS

Nesta etapa do trabalho são descritos os procedimentos empregados para realizar a modelagem geoestatística da batimetria da plataforma de Santos. Conforme descrito anteriormente à plataforma foi dividida em cinco setores com o propósito de melhorar o

processamento computacional. A resolução espacial adotada para geração do modelo morfológico foi de um grid de 50 m para todos os cinco setores da plataforma.

4.2.6.1 ANÁLISE VARIOGRÁFICA DA BATIMETRIA DO SETOR 1

Conforme descrito no subitem 4.2.4, observada a tendência da batimetria, do Setor 1, esta foi subtraída utilizando uma função de regressão quadrática, cujos parâmetros calculados consistiram em: $A_0 = 105961.2289292$; $A_1 = -0.028482691953141$; $A_2 = 3.8231034370355E-011$; $A_3 = -0.0018732718450871$; $A_4 = -5.0631784199967E-009$; $A_5 = -3.0776681013334E-009$, originando dessa forma a superfície observada no mapa da figura 8-B. Calculada a diferença entre a batimetria bruta (variável aleatória, fig. 9-A) e a função de tendência (regressão quadrática da função 5.0, fig. 8-B), foi obtido o mapa de resíduos (fig. 9-C).

Conforme observado nos mapa da figura 9-C, os resíduos obtidos pela diferença entre a batimetria bruta e a função de tendência realçam a variável de interesse (DUBRULE, 2003), que para esta aplicação têm significado sobre a variável geológica de morfologia. Outra característica observada neste processo foi que as amostras do resíduo, apresentam estacionadas centradas em zero, observado pela média e mediana tendendo para zero o que satisfaz a prerrogativa de estacionaridade das amostras em torno de uma média (Estatísticas, fig. 9-C).

Finalizada a etapa exploratória onde foram realizados os ajustes de tendência e estacionaridade dos dados amostrais de batimetria, a etapa seguinte, consistiu no ajuste do variograma teórico aos variogramas experimentais. Para este propósito foram gerados três variogramas sendo o primeiro o omni-direcional, o segundo direcionado para o menor eixo de variância espacial e último direcionado para o maior eixo de variância espacial. Estas direções foram obidas a partir da observação visual do eixo de orientação das feições obtidas no mapa de resíduos (fig. 9-C).

Para o Setor 1, foram gerados três variogramas sendo o primeiro omni-direcional, o segundo de menor variância espacial com direção de 45° e o terceiro com maior variância espacial com 135° perpendicular ao eixo de menor variância (fig. 10). Conforme pode-se observar nos variogramas experimentais (fig. 10) estes, apresentam

efeito pepita zero para todas as direções e um patamar a partir de 50.000 metros de distância.

Os variogramas experimentais foram gerados com um passo de 2.500 m e uma abertura de banda de 50.000 metros, sendo que os variogramas experimentais com direções de maior e menor variância foram gerados com uma tolerância de 20° (fig.10).

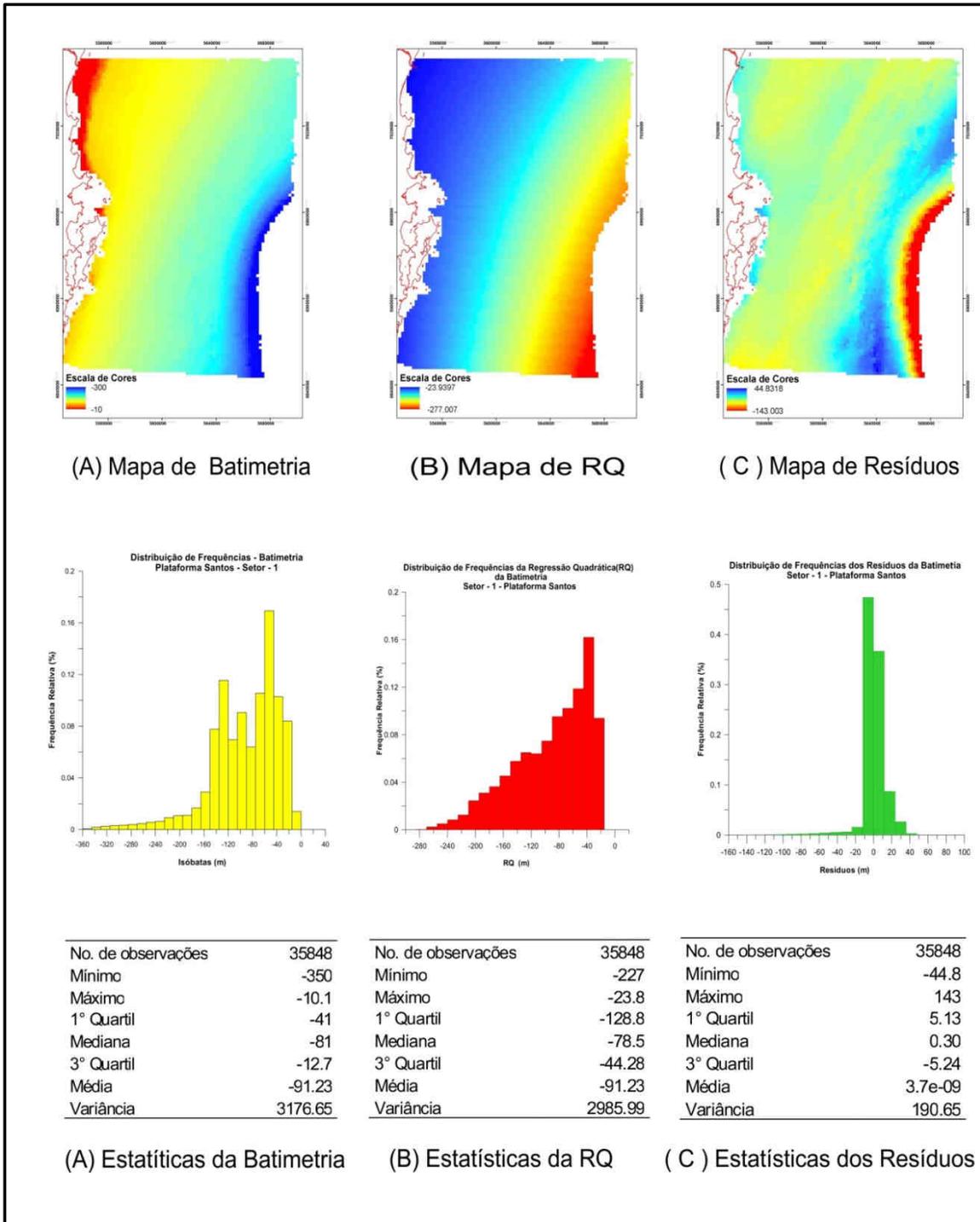


Figura 9: Mapas de batimetria bruta (A), regressão quadrática (B) e de resíduos (C) com as suas respectivas estatísticas para o setor 1 da plataforma de Santos.

Finalizada a etapa de geração dos variogramas experimentais, foi realizada a etapa de ajuste dos variogramas teóricos e posterior processo de krigagem. Os variogramas foram ajustados utilizando o modelo esférico com amplitude máxima de 50.000 metros e amplitude média de 44.000 m. Os variogramas teóricos foram ajustados de forma solidária ao variograma omni-direcional (figuras 11, 12 e 13).

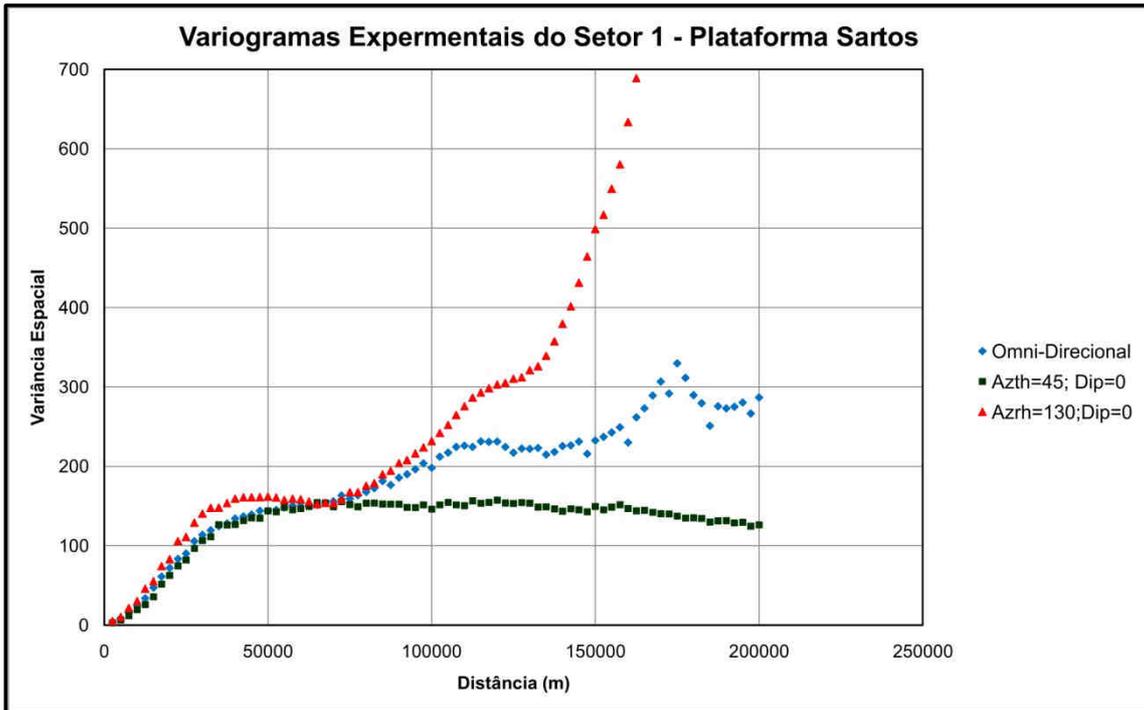


Figura 10: Variogramas experimentais dos resíduos para o Setor-1 da Plataforma de Santos.

Outra característica observada no variograma experimental omni-direcional (fig.11) consistiu em que as estruturas se repetem de maneira cíclica e se correlacionam bem com as estruturas observadas no mapa de resíduos (fig. 9-C) onde se podem observar três estruturas bem definidas, uma próxima a linha de costa, e as outras duas mais afastadas entre a plataforma média indicando domínios sedimentares da plataforma.

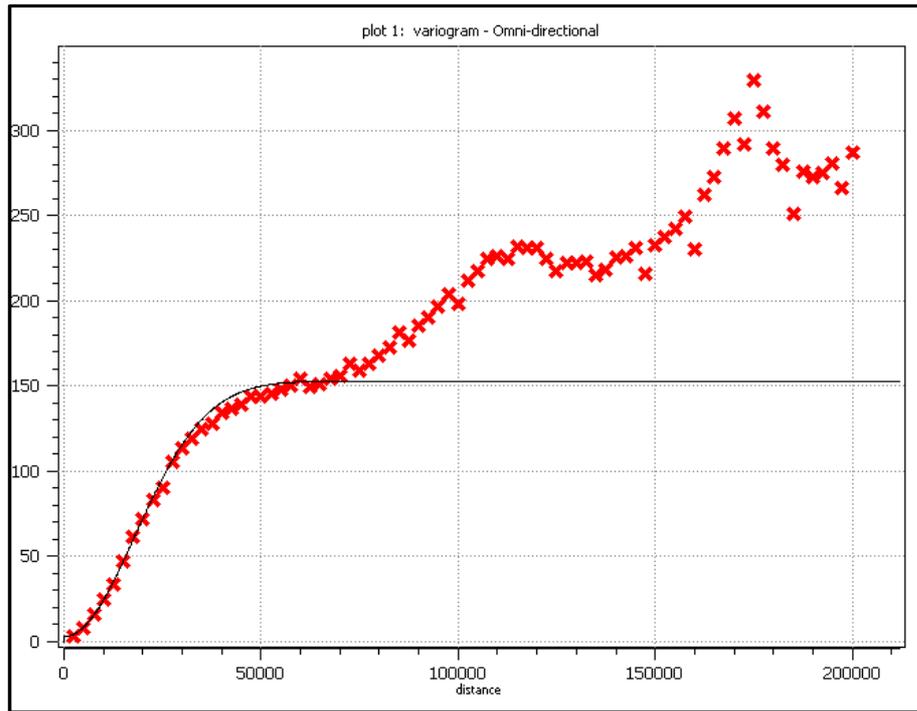


Figura 11: Variograma Omni-direcional experimental ajustado ao modelo teórico do resíduo para o setor 1 da plataforma de Santos.

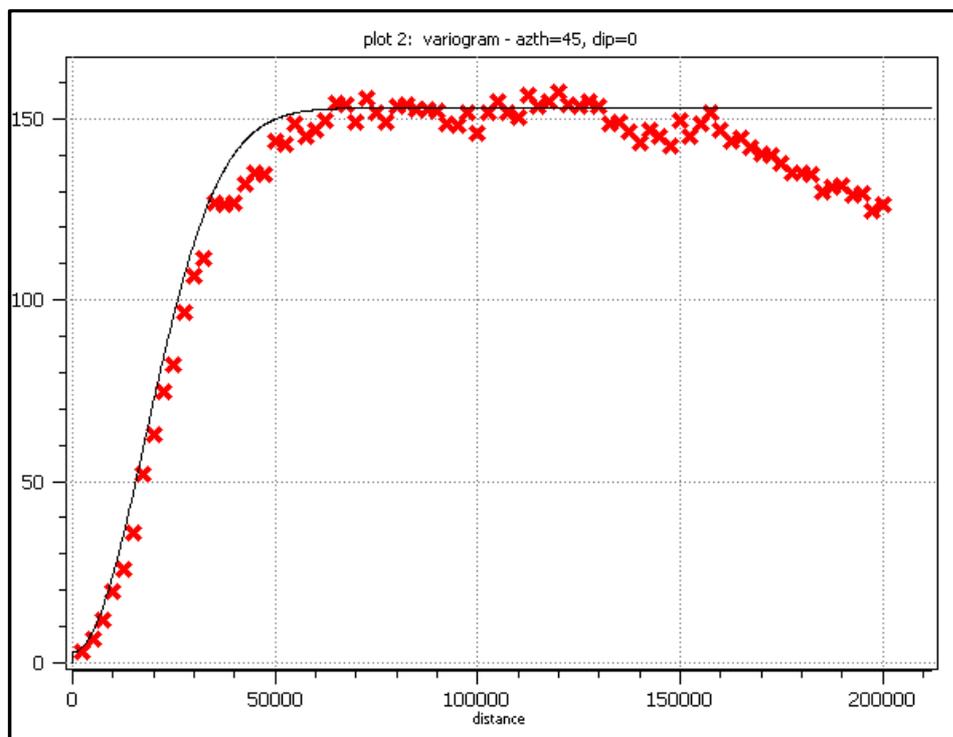


Figura 12: Variograma teórico com azimute de 45° (escala trigonométrica) para o setor 1 da plataforma de Santos.

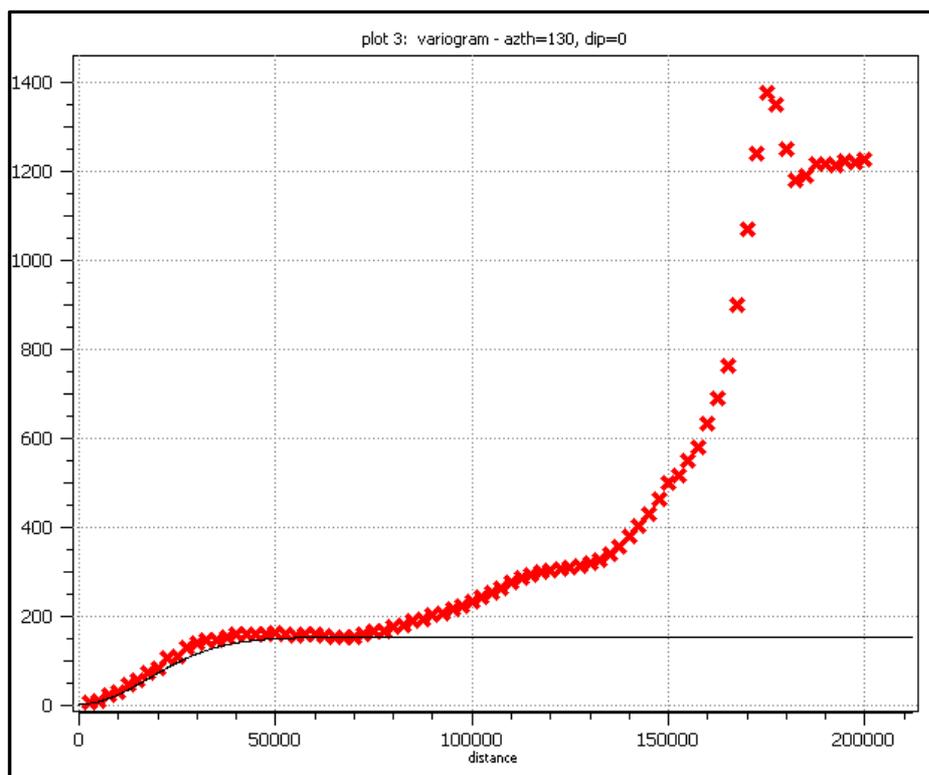


Figura 13: Variograma teórico com azimute de 135o (Escala Trigonométrica) para o setor 1 da plataforma continental de Santos

O ajuste dos variogramas experimentais do Setor 1 priorizou o melhor ajuste do variograma omni-direcional conforme observado nos variogramas das figuras 12 e 13. Terminada a interpolação por krigagem o grid dos resíduos foi obtido. A etapa seguinte consistiu em obter a batimetria real das amostras. Este processo consistiu em fazer a operação inversa $[Z(x,y) = F_{res}(x,y) + Z^*(x,y) \text{ (5.2) }]$, onde a soma dos *grids* dos resíduos com a o *grid* da regressão quadrática resultam no *grid* de batimetria.

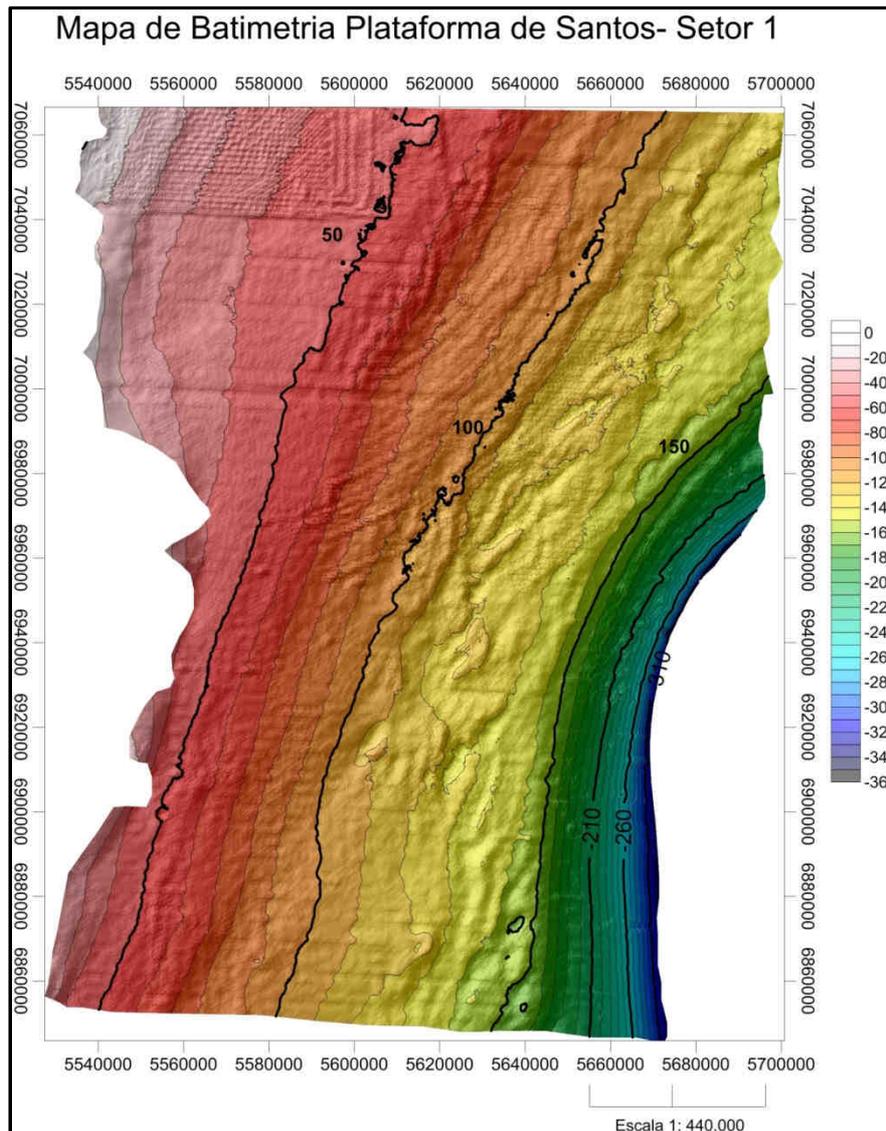


Figura 14: Mapa de batimétrico do Setor-1 da plataforma da bacia de Santos. Em (1) observa-se o ruído modelado no processo de interpolação geoestatística; em (2) os grandes domínios Morfosedimentares.

Finalizado este processo observa-se que artefatos oriundos da geometria de aquisição foram injetados no processo de interpolação sendo ressaltados pelo processo de interpolação geoestatística, conforme observado no mapa da figura 13. Observa-se também que o processo de interpolação definiu de forma satisfatória os domínios morfosedimentares da plataforma de Santos onde se pode observar a presença de três grandes domínios de sedimentação (fig. 13). Por fim este processo foi repetido para os cinco setores da plataforma de Santos.

4.2.6.2 ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO SETOR 2

Para a extração da função de regressão quadrática da batimetria do Setor-2, os parâmetros utilizados foram: $A_0 = 38571.866452838$; $A_1 = 0.0015196152780374$; $A_2 = -1.9094492320148E-010$; $A_3 = 0.011812694907731$; $A_4 = 8.3347223728321E-010$; $A_5 = -4.7226838784633E-010$. Na figura 14-C pode-se observar o mapa de resíduos resultante da diferença entre as amostras de batimetria e a regressão quadrática (Figuras 15-A e 15-B) segundo proposta de Dubrule, (2003) para extração de tendência e normalização das amostras de interesse.

A etapa subsequente consistiu na geração dos variogramas experimentais dos resíduos para o Setor-2. Para este setor também foram gerados três variogramas experimentais sendo o primeiro variograma omni-direcional e os subsequentes de máxima e mínima variância espacial (fig.16). Nestes se observa que o variograma com orientação de 45° apresenta a menor variância espacial e bem como o variograma perpendicular a esta direção apresenta maior variância espacial (fig.16).

Para o ajuste do variograma teórico foram utilizados os três variogramas experimentais priorizando o melhor ajuste para o variograma omni-direcional (Figuras 17, 18 e 19). O alcance máximo para estes variogramas foi de 21.600 metros com alcance médio de 16.000 m. O patamar de variância ficou em torno de cinco, com efeito, pepita nulo. Conforme observado nos variogramas experimentais do Setor-1, os variogramas do Setor-2 também apresentaram um caráter cíclico na variância espacial em função da distância, sendo indicativos de estruturas semelhantes em posições mais afastadas.

Ajustados os parâmetros do variograma teórico, os resíduos das amostras de batimetria foram krigados utilizando o estimador de krigagem ordinária. Finalizado o processo de krigagem o *grid* de resíduos foi somado ao *grid* da regressão quadrática com o objetivo de obter a topografia interpolada (fig. 20).

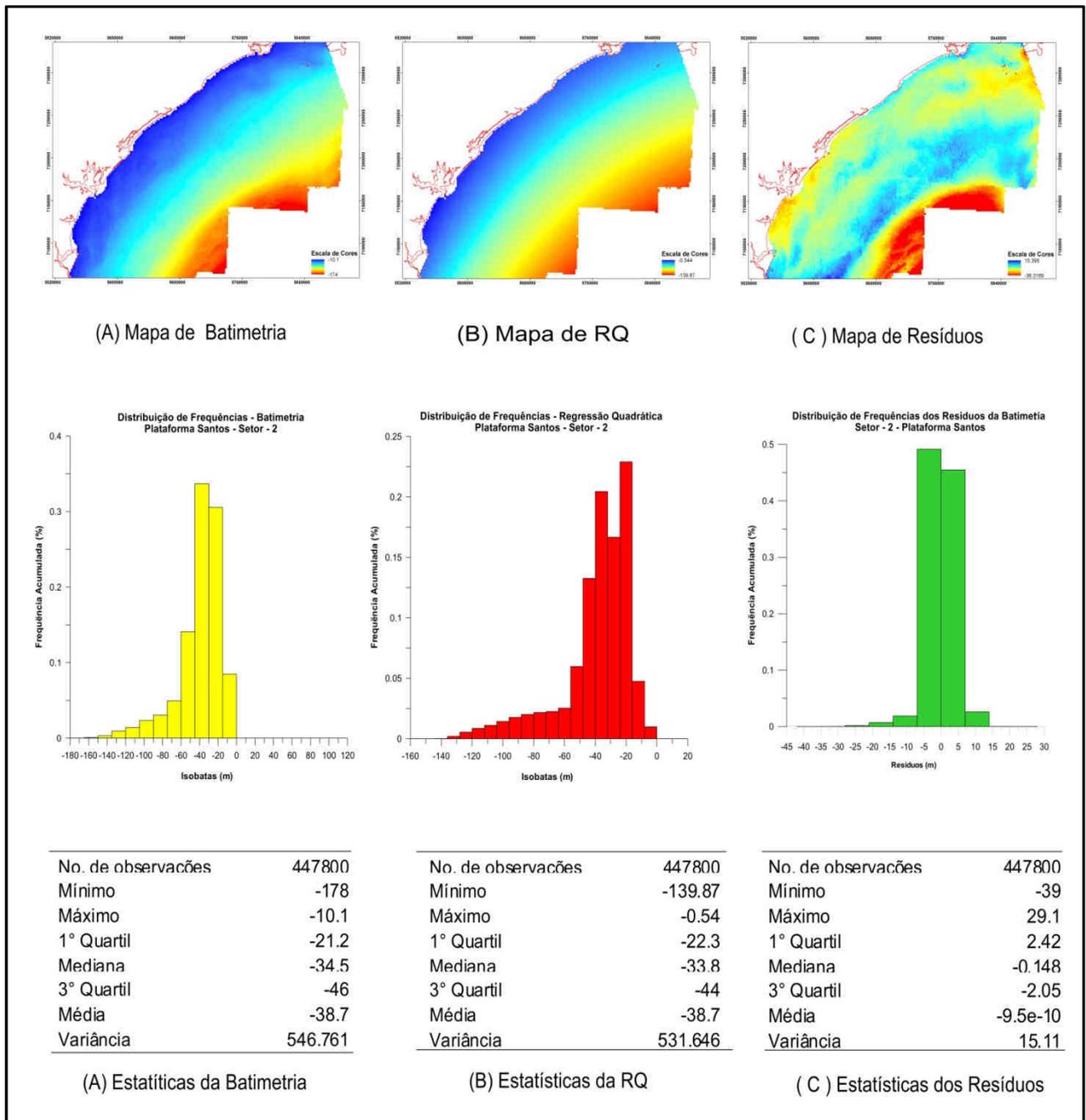


Figura 15: Mapas de batimetria bruta (A), regressão quadrática (B) e de resíduos (C) com as suas respectivas estatísticas para o setor 2 da plataforma de Santos.

A partir do mapa de batimetria do Setor-2 observa-se que os ruídos pertinentes ao levantamento foram modelados imprimindo sobre a morfologia gerada a geometria do levantamento (fig.20). Também foi possível observar que a presença de estruturas morfosedimentares tanto na plataforma interna quanto externa.

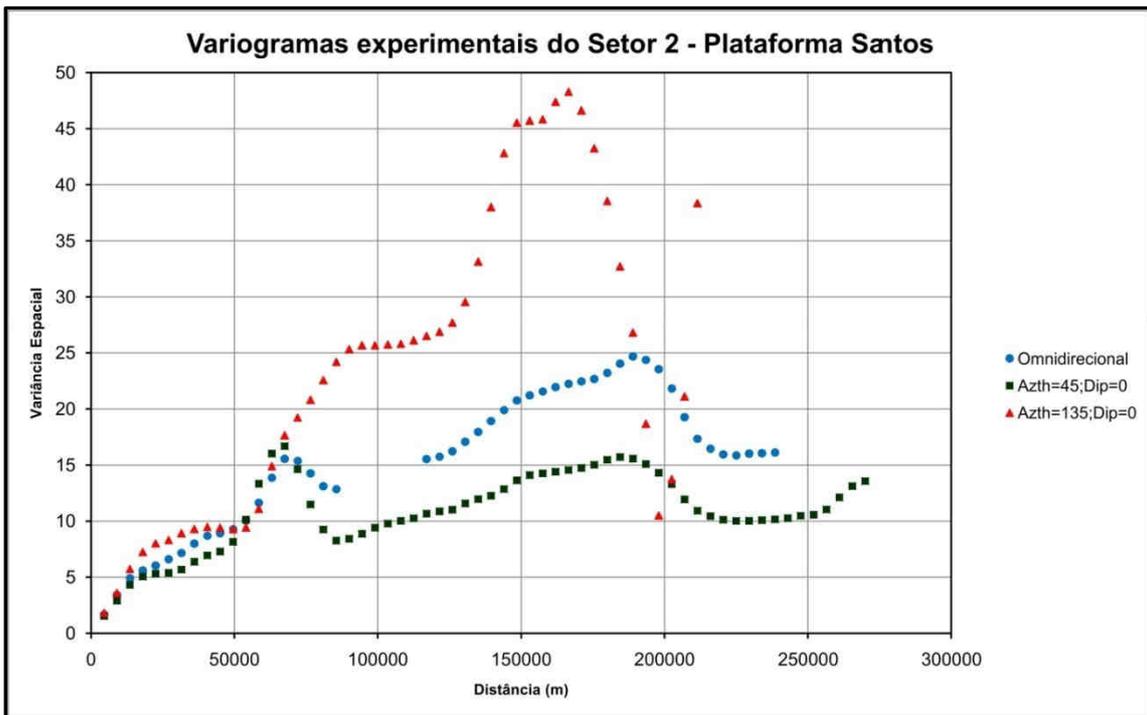


Figura 16: Variogramas experimentais dos resíduos para o Setor-2 da área da plataforma de Santos.

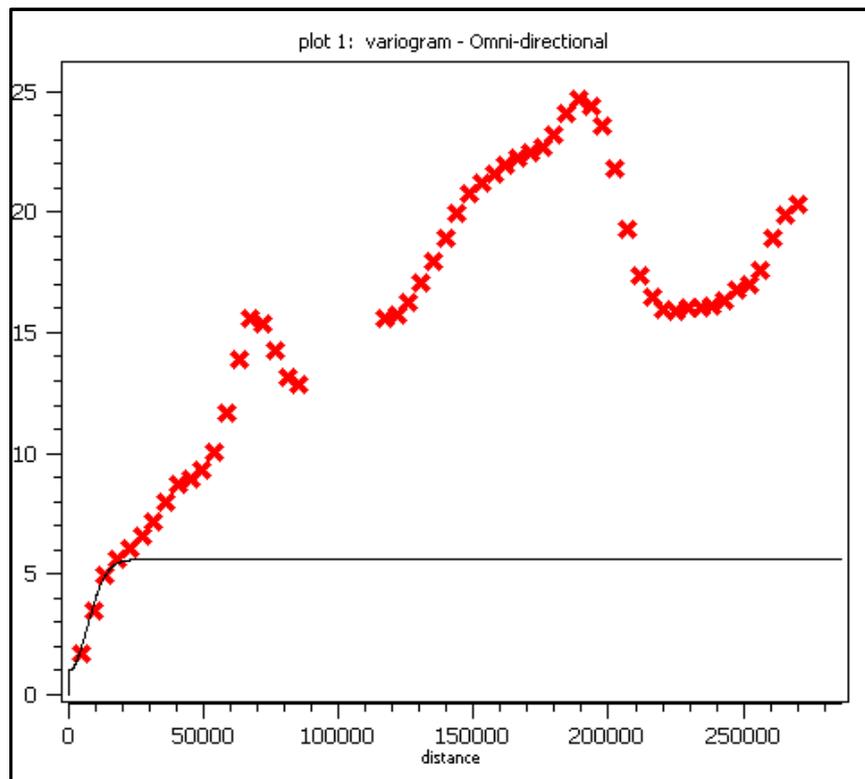


Figura 17: Variograma experimental Omni-dimensional da plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance máximo de 21.000 metros.

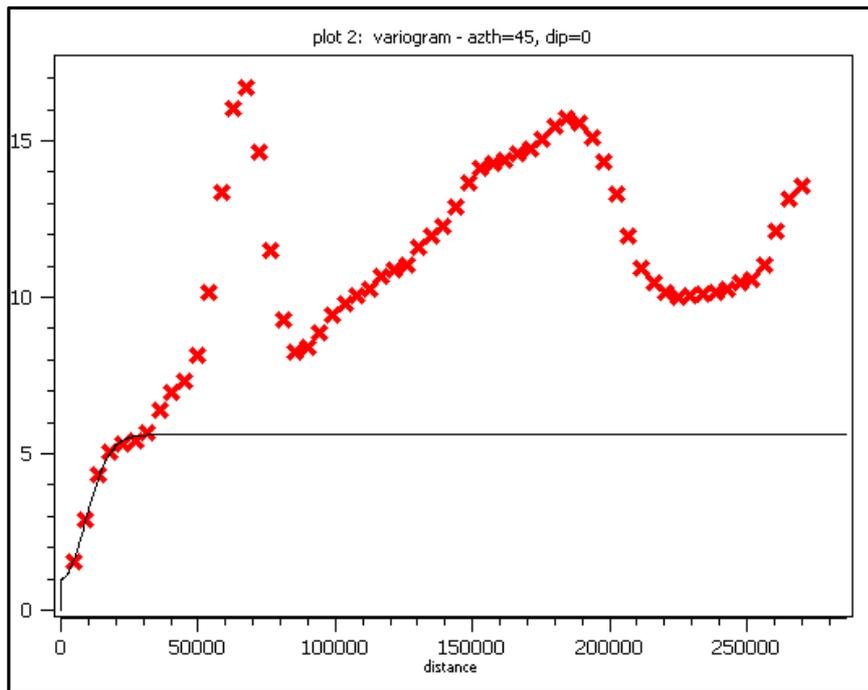


Figura 18: Variograma teórico com direção de 45º para o Setor-2 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance médio de 16.000 metros.

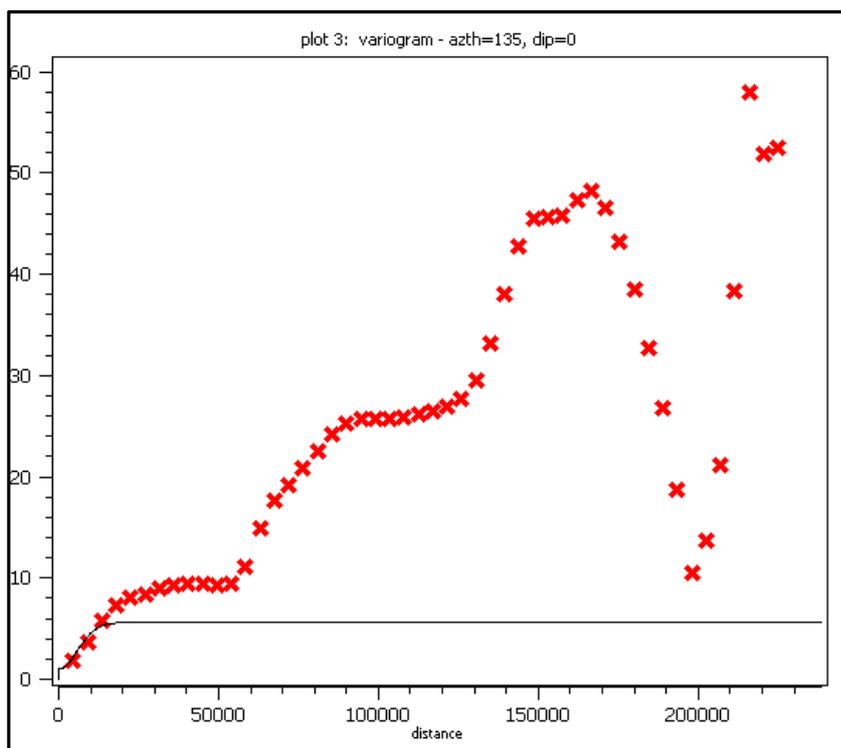


Figura 19: Variograma teórico com direção de 135º para o Setor-2 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance médio de 16.000 m.

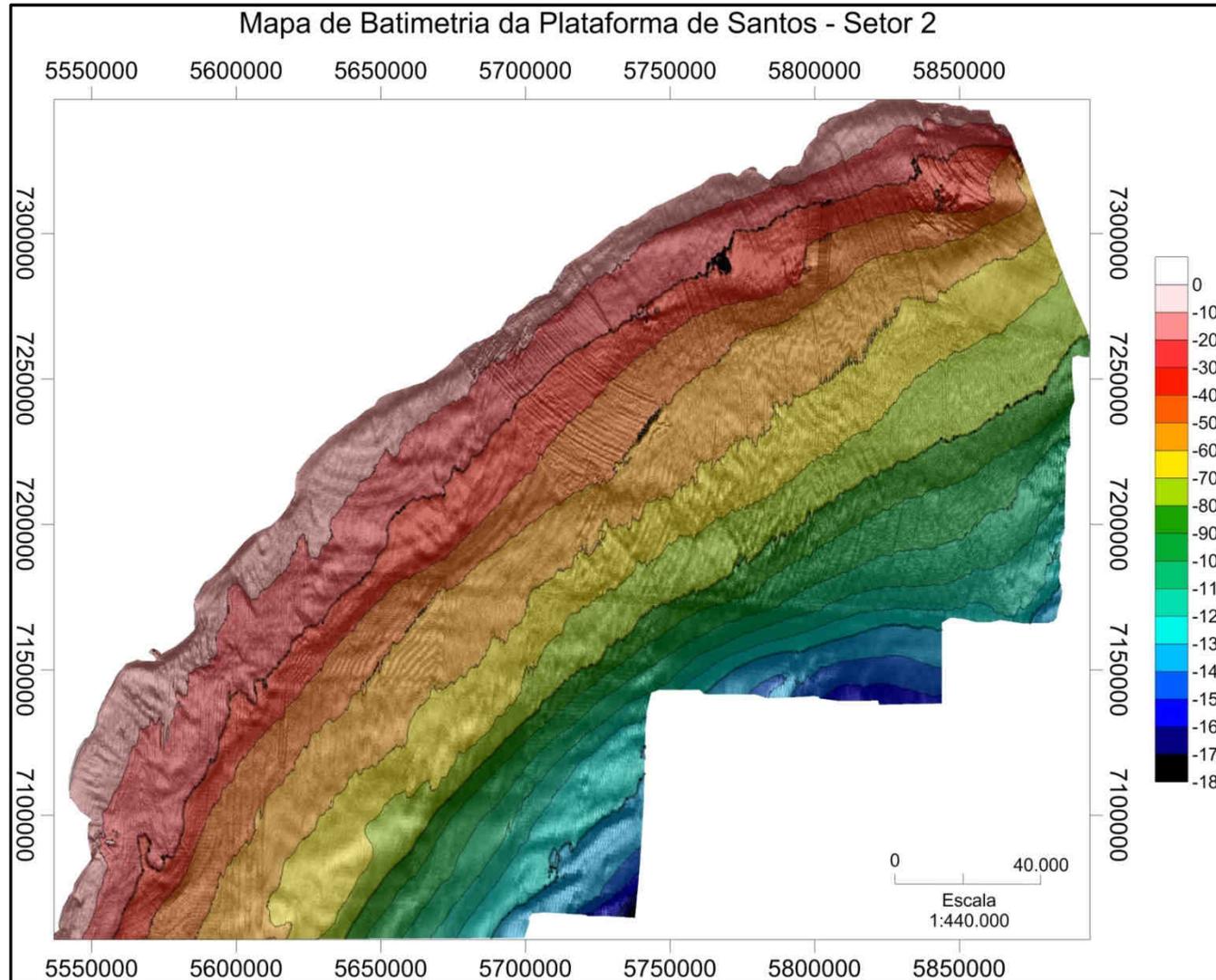


Figura 20 Mapa batimétrico resultante da interpolação por krigagem ordinária do Setor-2 da Plataforma de Santos. Em (1) observa-se o ruído modelado no processo de interpolação geoestatística; em (2) os grandes domínios Morfosedimentares.

4.2.6.3 ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO SETOR 3

A função de regressão quadrática da batimetria do Setor-3 foram empregados os parâmetros: $A_0 = 82526.87821164$; $A_1 = 0.010933390331822$; $A_2 = -2.0958835562881E-009$; $A_3 = -0.041803189836534$; $A_4 = 3.491722588045E-009$; $A_5 = -1.3080251873587E-009$. No mapa de resíduos se observa a presença de três grandes domínios morfológicos (fig. 21-C). Neste setor foram gerados quatro variogramas experimentais (fig.22) com o propósito de mapear a menor e a maior variância espacial deste trecho da plataforma continental de Santos. Nesta foi possível observar que a menor variância espacial foi a de direção de 30° bem como a maior foi perpendicular à direção de menor variância.

Os variogramas experimentais dos resíduos do Setor-3 utilizados para a krigagem deste trecho foram o omni-direcional e os de direção de 30° e 120° (figuras 23, 24 e 25). Os variogramas teóricos foram ajustados visando o melhor ajuste do variograma omni-direcional (Fig. 23). O alcance máximo para estes variogramas foi de 20.000 metros com alcance médio de 7.000 m. O patamar de variância ficou em torno de 40, com efeito, pepita nulo. Estes variogramas apresentaram o mesmo caráter cíclico da variância espacial em função da distância, sendo que a batimetria foi obtida obedecendo aos critérios apresentados nos itens 4.2.6.1 e 4.2.6.2 (fig.26).

O mapa de batimetria do Setor-3 resultante da modelagem geoestatística apresentou um ruído instrumental radial dominante bem como outros artefatos de geometrias variadas. Estes ruídos por sua vez, foram injetados ao processo de interpolação somando-se a variável morfométrica (fig. 26). Embora este trecho apresente um considerável ruído instrumental, também é possível observar domínios geomorfológicos entre a plataforma interna média e externa.

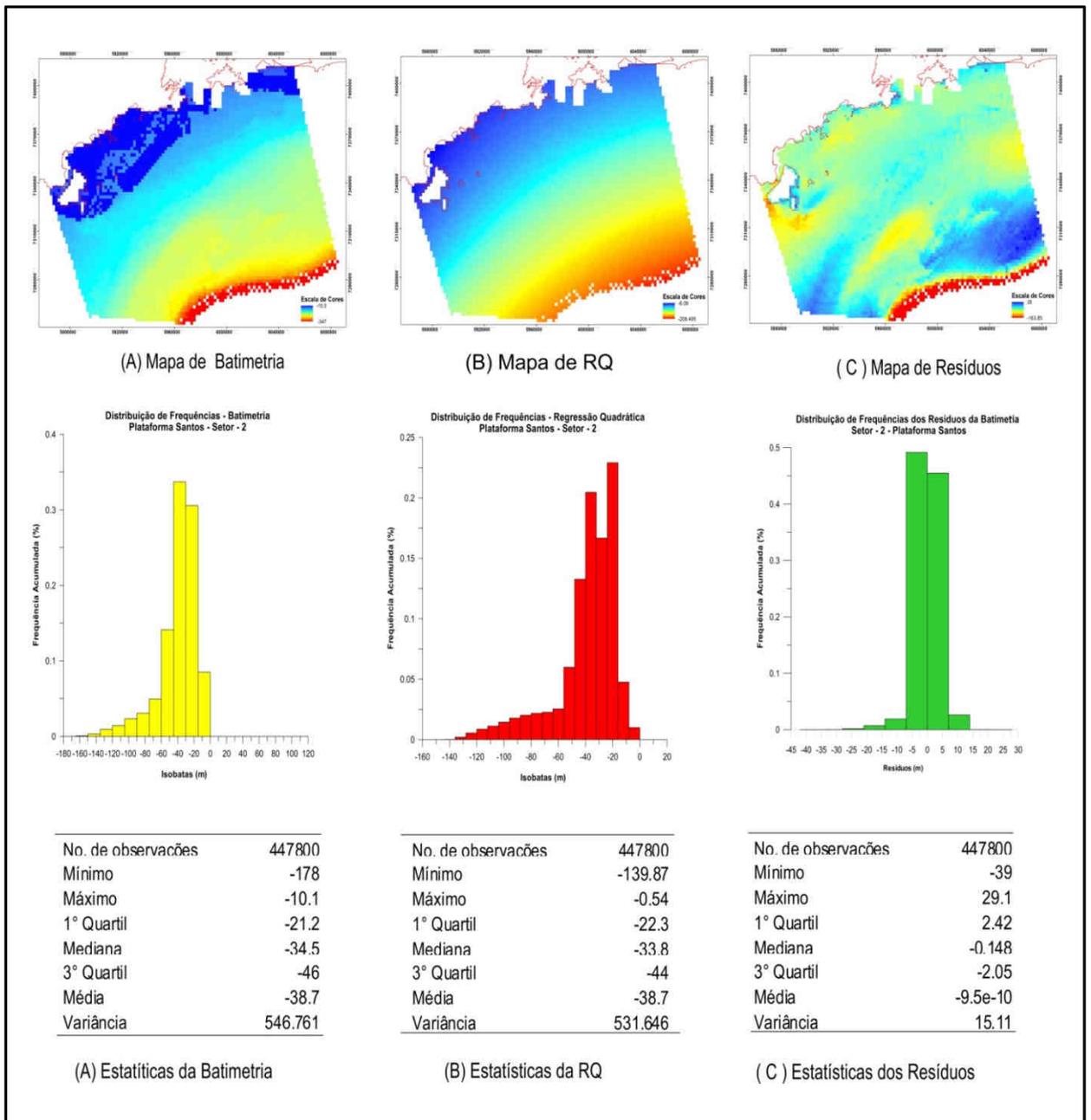


Figura 21 Mapas de batimetria bruta (A), regressão quadrática (B) e de resíduos (C) com as suas respectivas estatísticas para o setor 3 da plataforma de Santos.

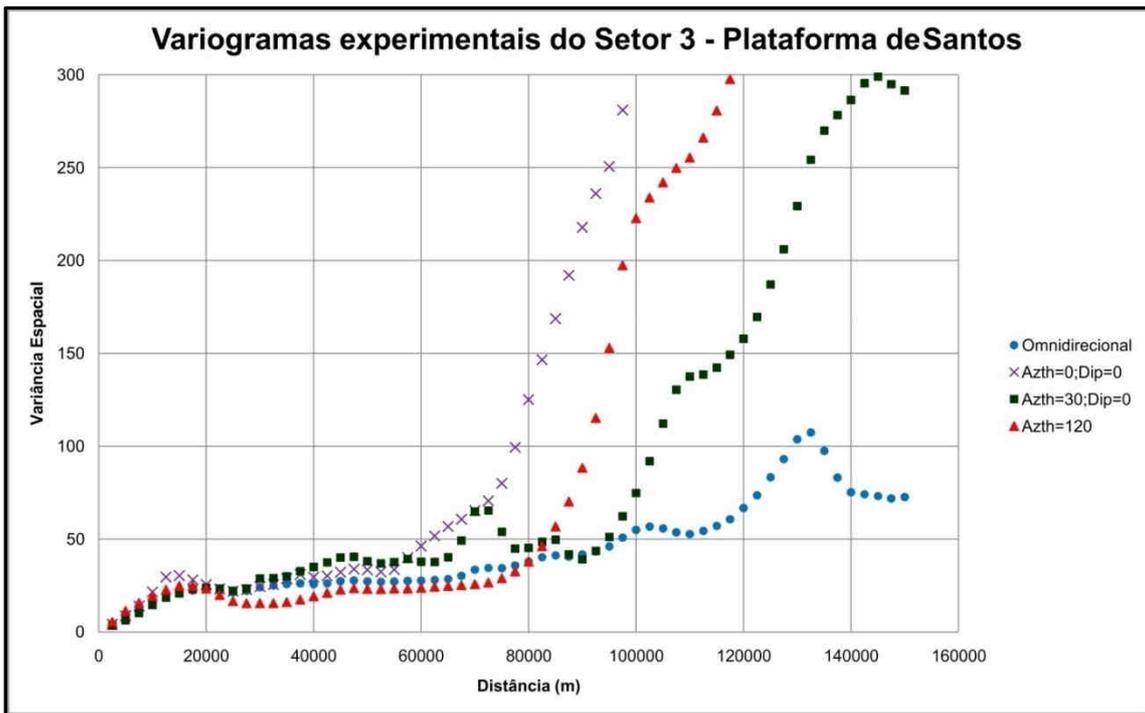


Figura 22: Variogramas experimentais para o setor 3 da plataforma de Santos.

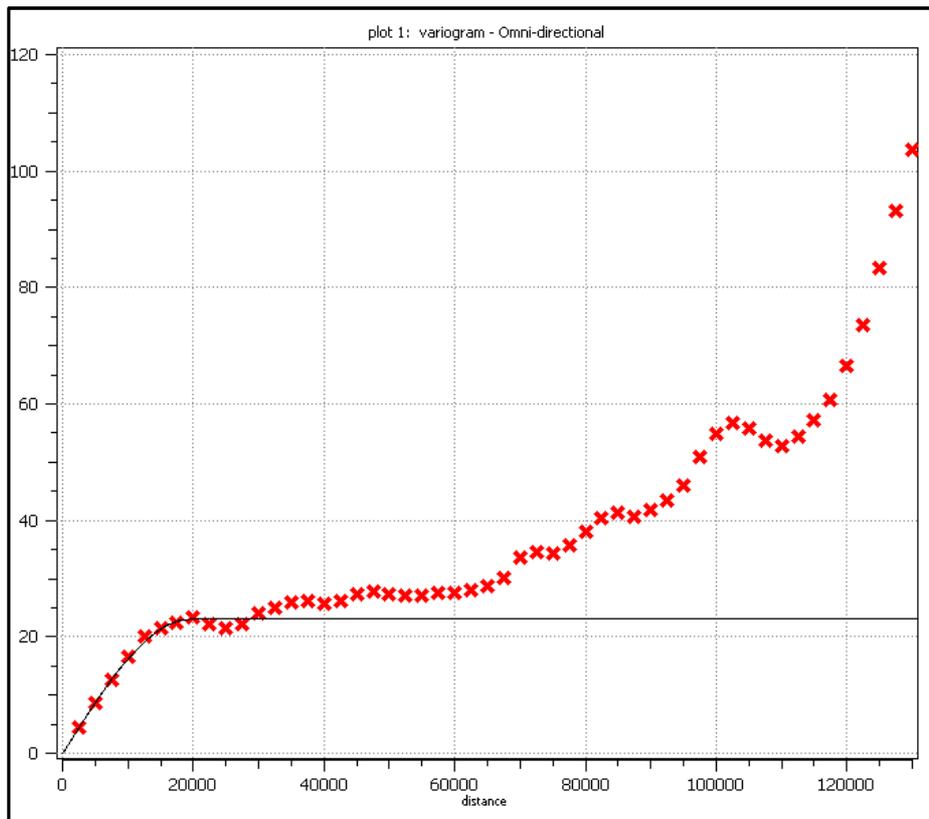


Figura 23: Variograma experimental Omni-dimensional da plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance máximo de 19.500 metros.

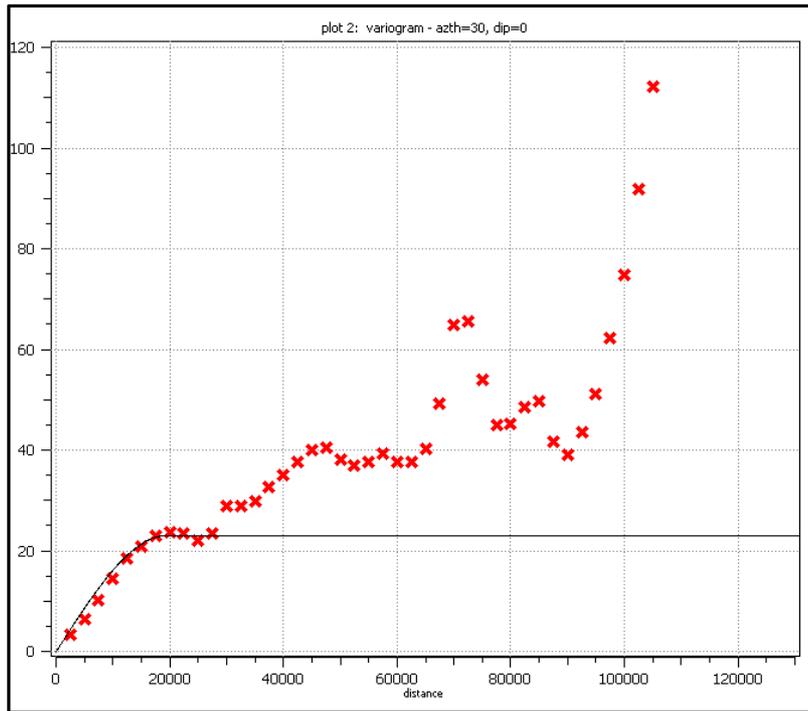


Figura 24: Variograma teórico com direção de 30° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-3 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance médio de 19.500 m.

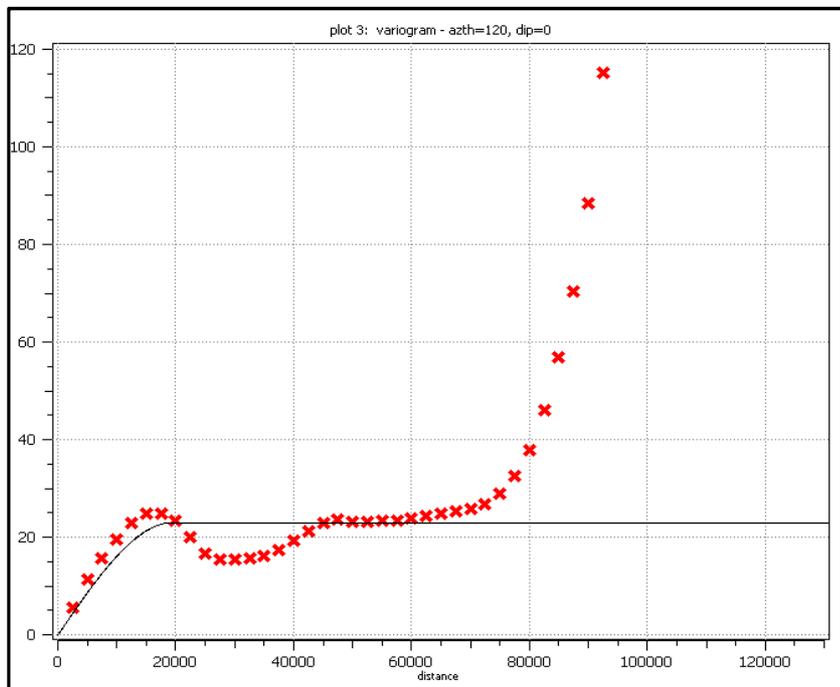


Figura 24: Variograma teórico com direção de 120° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-3 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance médio de 19.500 m.

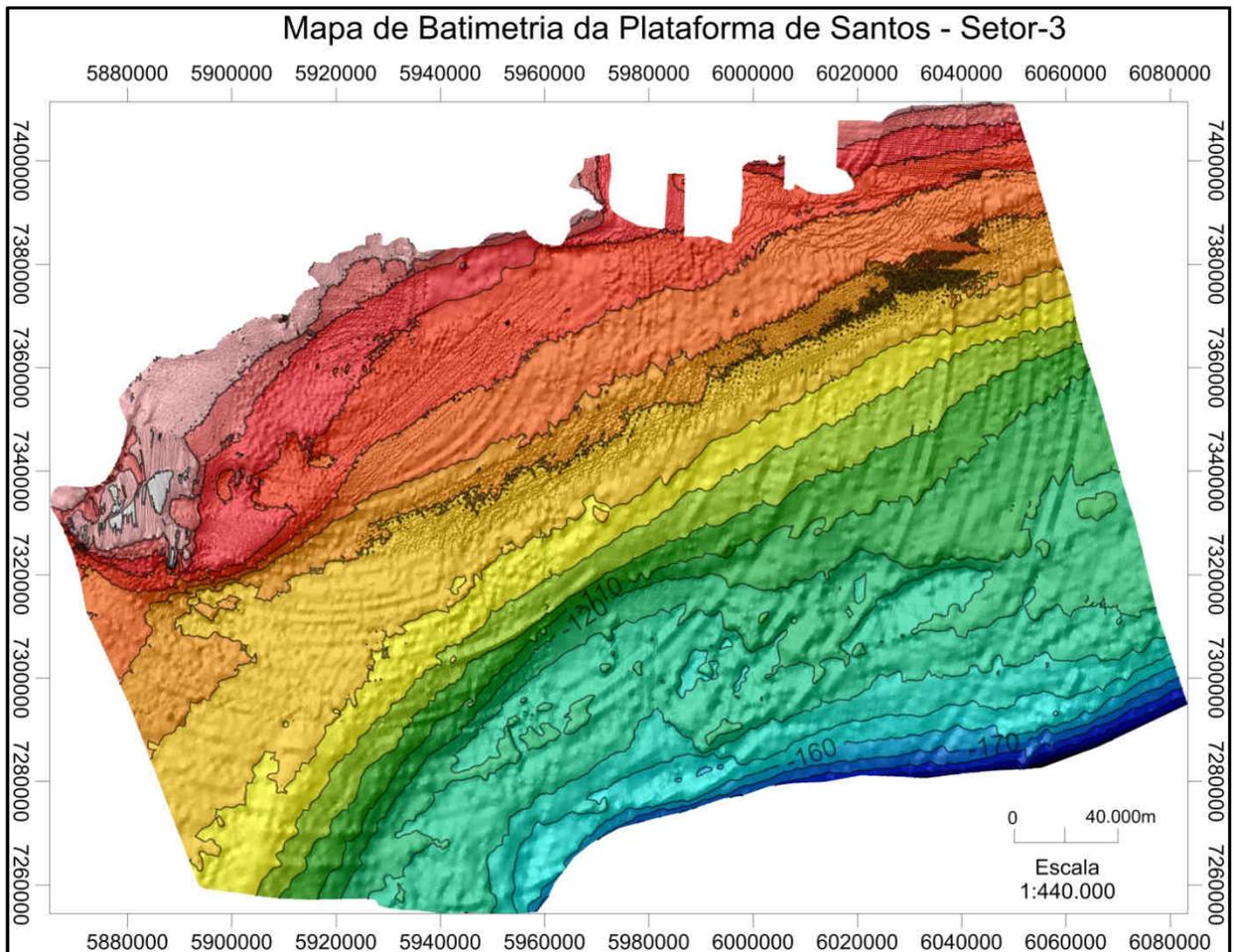


Figura 25: Mapa batimétrico resultante da interpolação por krigagem ordinária do Setor-3 da Plataforma de Santos. Em (1) observa-se o ruído modelado no processo de interpolação geoestatística; em (2) os grandes domínios Morfosedimentares; em (3) extrapolação da interpolação na porção continental em Ilha Grande - São Paulo.

4.2.6.4 ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO SETOR 4

A função de regressão quadrática da batimetria do Setor-3 foram empregados os parâmetros: $A_0 = 172205.04756507$; $A_1 = -0.035160120584289$; $A_2 = 1.4900481669263E-009$; $A_3 = -0.015383767368545$; $A_4 = 2.3840681696489E-009$; $A_5 = -2.0007718935879E-010$. Neste setor foram gerados seis variogramas experimentais (fig.27) com o propósito de mapear a menor e a maior variância espacial deste trecho da plataforma continental de Santos. Nesta foi possível observar que a menor variância espacial foi a de direção de 120° e a maior com direção de 30° (figuras 28 e 29).

Os variogramas experimentais dos resíduos do Setor-4 utilizados para a krigagem deste trecho foram o omni-direcional com direções de 30° e 120° (figuras 28, 29 e 30). Os variogramas teóricos foram ajustados também visando o melhor ajuste do variograma omni-direcional. O alcance máximo para estes variogramas foi de 44.000 metros com alcance médio de 30.000 m. O patamar de variância ficou em torno de 40, com efeito, pepita de cinco. Estes variogramas também apresentaram o mesmo caráter cíclico da variância espacial em função da distância e a batimetria foi obtida obedecendo aos critérios apresentados nos itens anteriores. O mapa de batimetria do Setor-4 resultante da modelagem geoestatística apresentou um ruído instrumental radial na porção oeste, porém, com menor intensidade comparado ao modelo digital de terreno obtido no Setor-3 (fig. 31). Assim a morfologia de maneira geral não foi muito impactada pelo ruído instrumental.

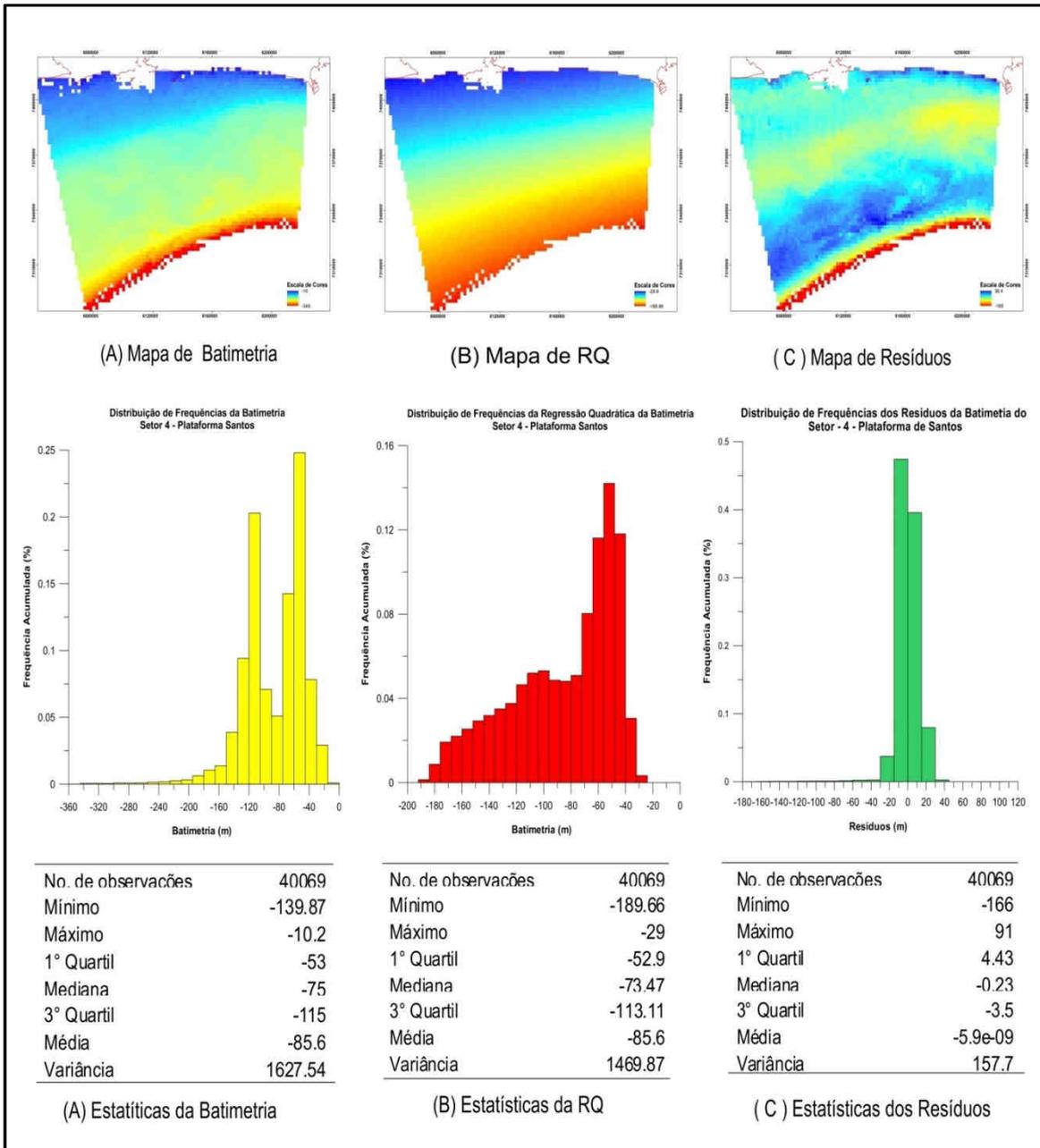


Figura 26: Mapas de batimetria bruta (A), regressão quadrática (B) e de resíduos (C) com as suas respectivas estatísticas para o setor 4 da plataforma de Santos.

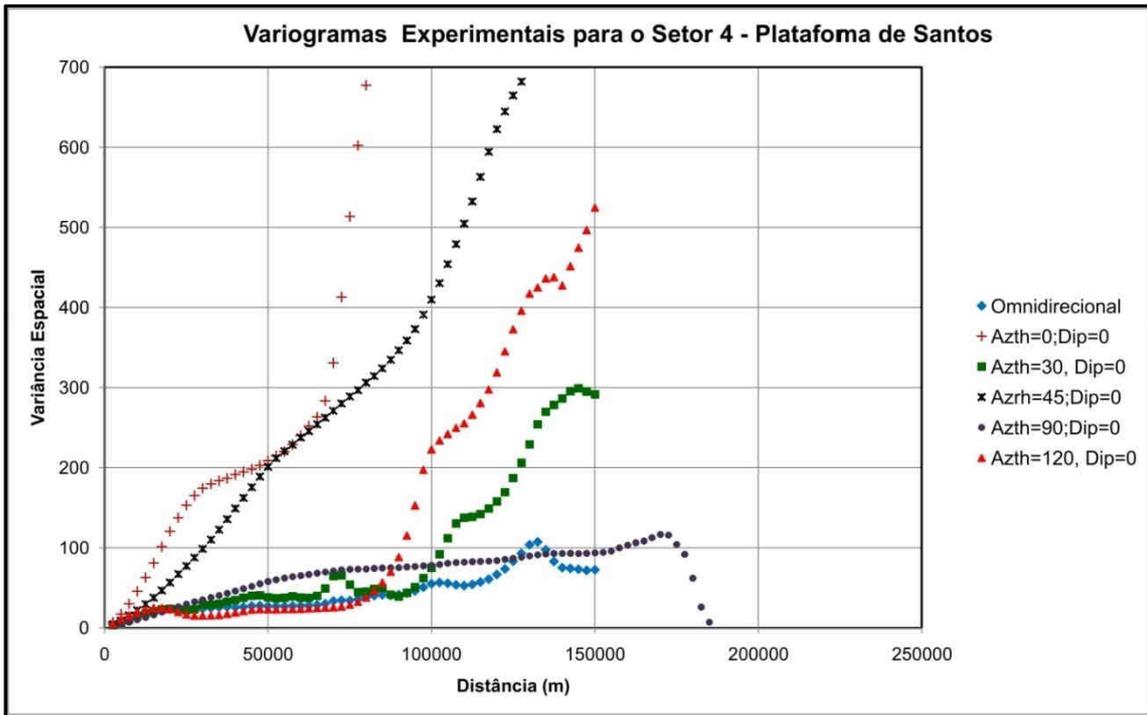


Figura 27: Variogramas experimentais para o setor 4 da plataforma de Santos.

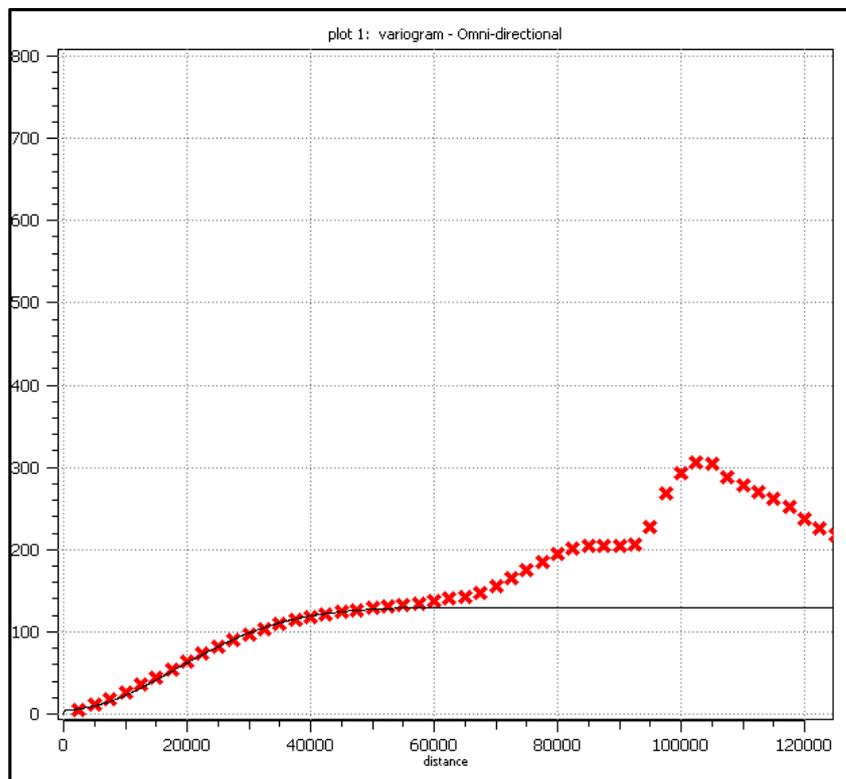


Figura 28: Variograma experimental Omni-dimensional da plataforma de Santos para o setor 4, ajustado por um modelo gaussiano com alcance máximo de 44.000 metros.

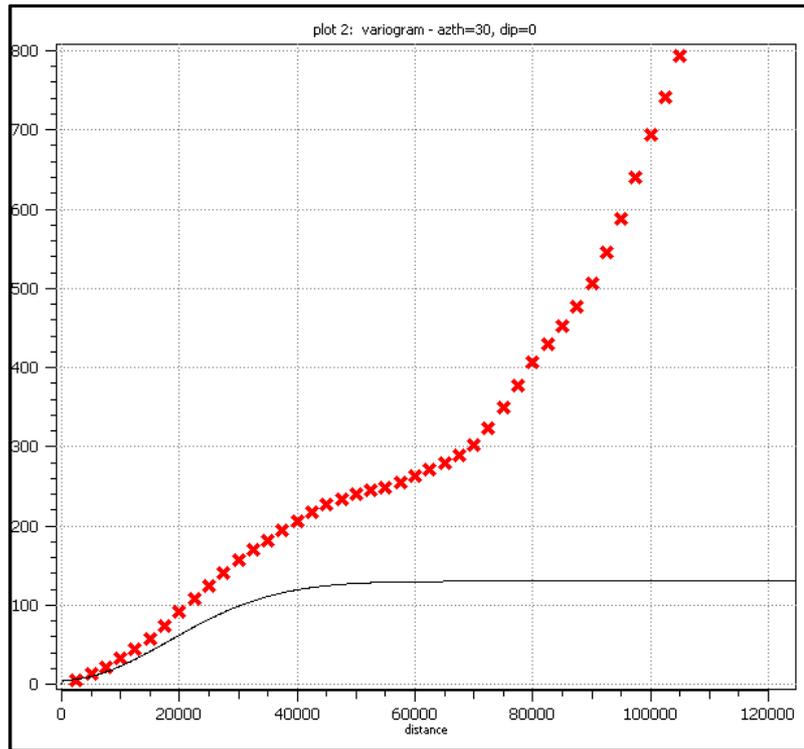


Figura 29 Variograma teórico com direção de 30° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-4 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo gaussiano com alcance médio de 44.000 m.

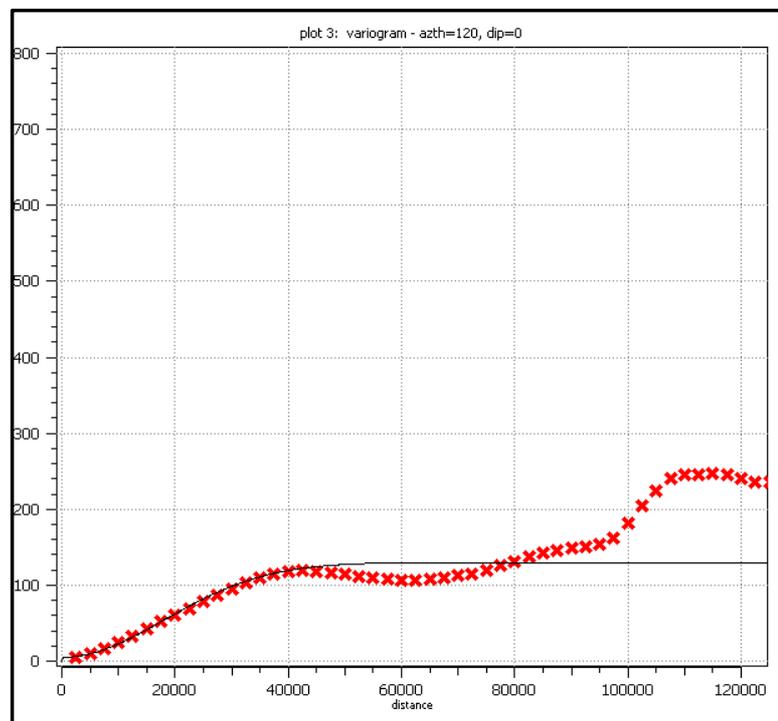


Figura 30: Variograma teórico com direção de 120° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-4 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo gaussiano com alcance máximo de 44.000 m.

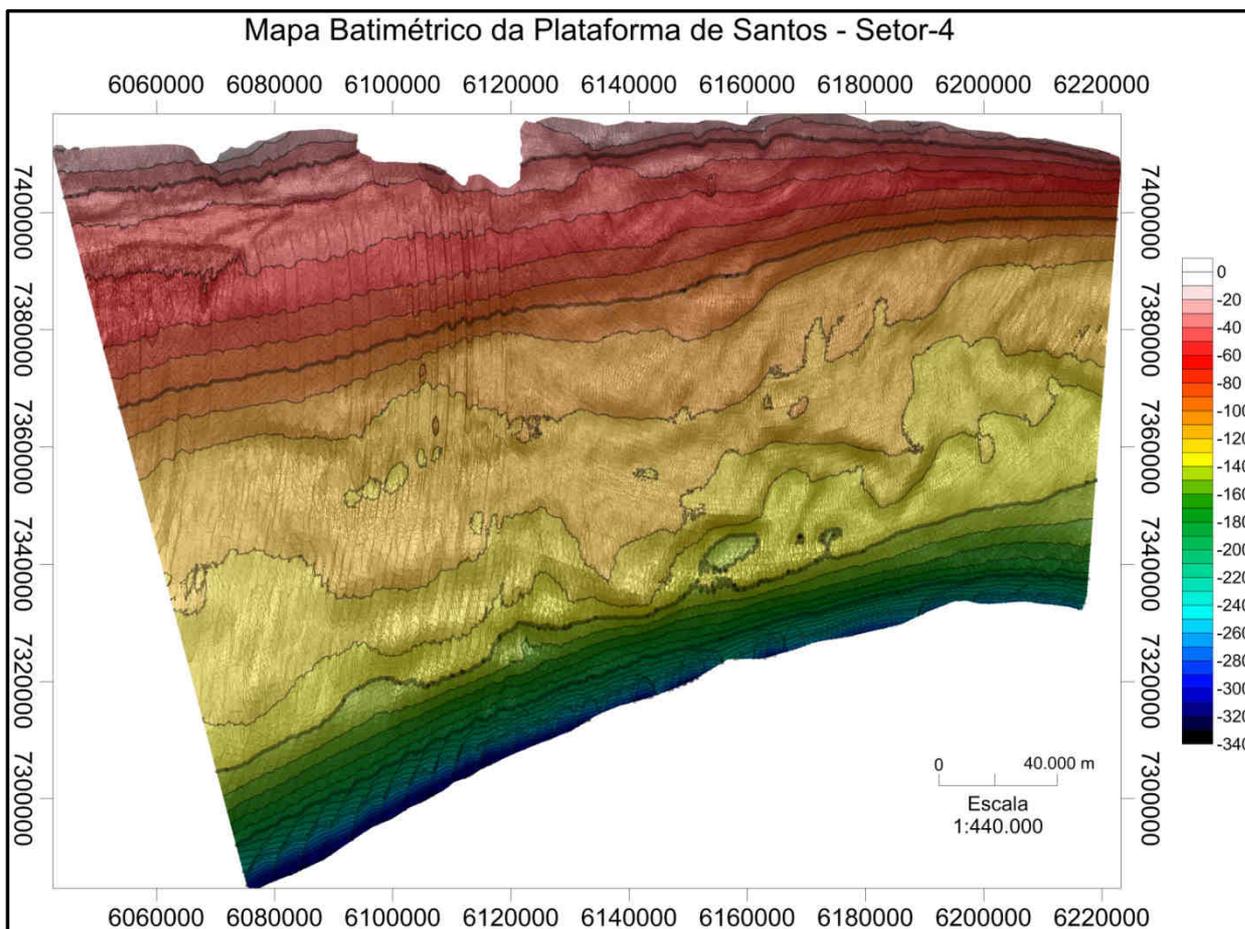


Figura 31: Mapa Batimétrico do Setor-4 resultante do processo de krigagem. Em (1) observa-se o ruído modelado no processo de interpolação geoestatística; em (2) os grandes domínios Morfosedimentares.

4.2.6.5 ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO SETOR 5

A função de regressão quadrática da batimetria do Setor-3 foram empregados os parâmetros: $A_0 = -938727.30023917$; $A_1 = 0.14085489301315$; $A_2 = -1.4653468553933E-009$; $A_3 = 0.13221932869326$; $A_4 = -1.8846800850033E-008$; $A_5 = 5.5966414275035E-010$. Neste setor foram gerados quatro variogramas experimentais (fig.33) onde foi possível observar que a menor variância espacial foi a de direção de 0° e a maior com direção de 90° (figuras 29 e 30).

Os variogramas experimentais dos resíduos do Setor-5 utilizados para a krigagem deste trecho foram o omni-direcional com direções de 0° e 90° (figuras 34, 35 e 36). Os variogramas teóricos foram ajustados e também visaram o melhor ajuste do

variograma omni-direcional. O alcance máximo para estes variogramas foi de 21.000 metros com alcance médio de 7.000 m. O patamar de variância ficou em torno de 90, com efeito, pepita de 40. Estes variogramas também apresentaram o mesmo caráter cíclico da variância espacial em função da distância e a batimetria foi obtida obedecendo aos critérios apresentados nos itens anteriores e o ajuste do variograma teórico com o experimental nos primeiros *lags* não foi bom em todos os variogramas utilizados na ajuste (figuras 34, 35 e 36).

O mapa de batimetria do Setor-5, apresentou um baixo ruído instrumental radial na sua porção central, (fig. 37), sendo possível identificar bem as feições geomorfológicas.

Finalizada a etapa de interpolação geoestatística os cinco setores foram integrados por meio de um processo de mosaicagem resultando no mapa de batimetria da plataforma continental de Santos (fig.38), sendo possível delimitar seus principais domínios geomorfológicos em escala regional.

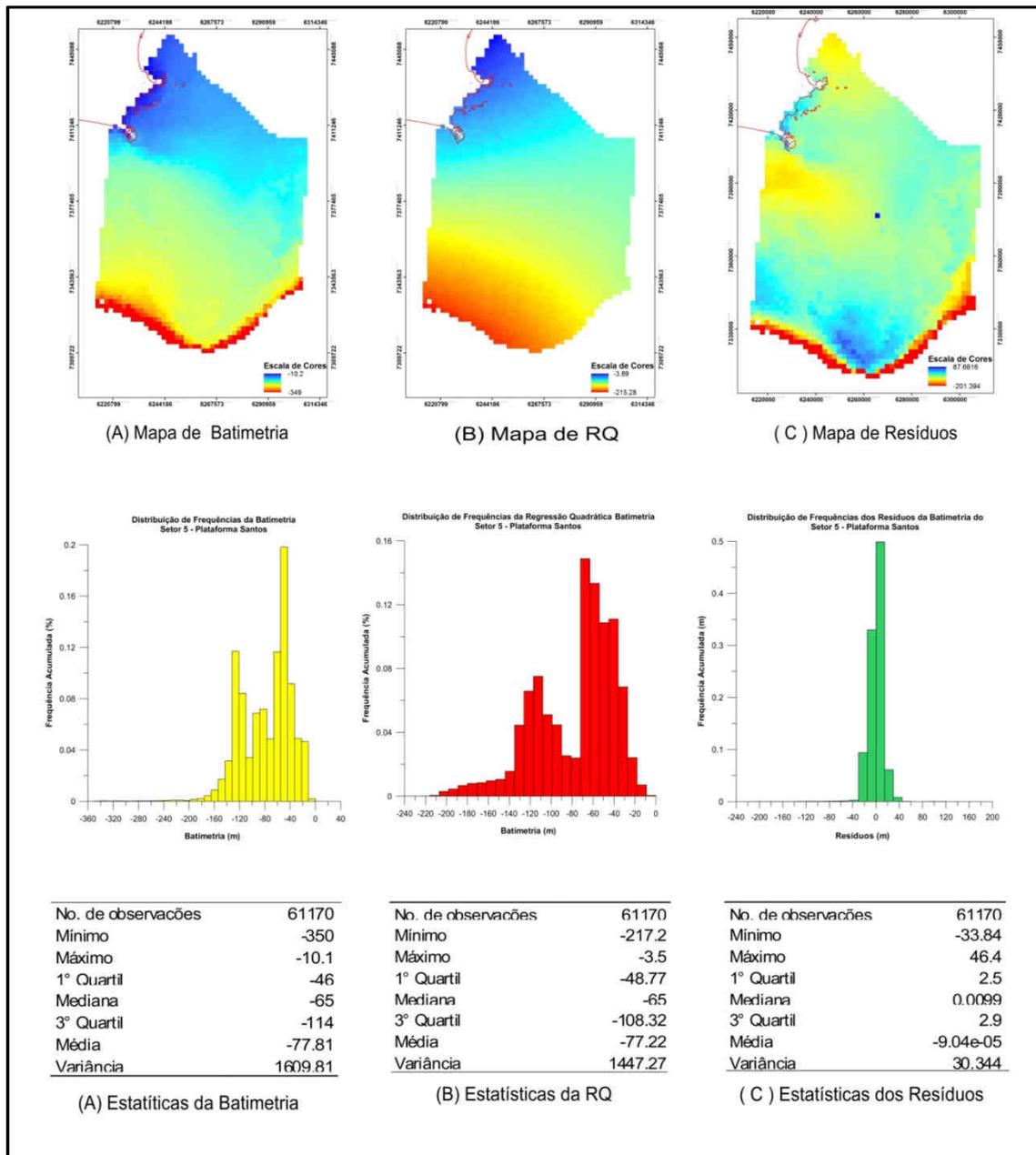


Figura 32: Mapas de batimetria bruta (A), regressão quadrática (B) e de resíduos (C) com as suas respectivas estatísticas para o setor 5 da plataforma de Santos.

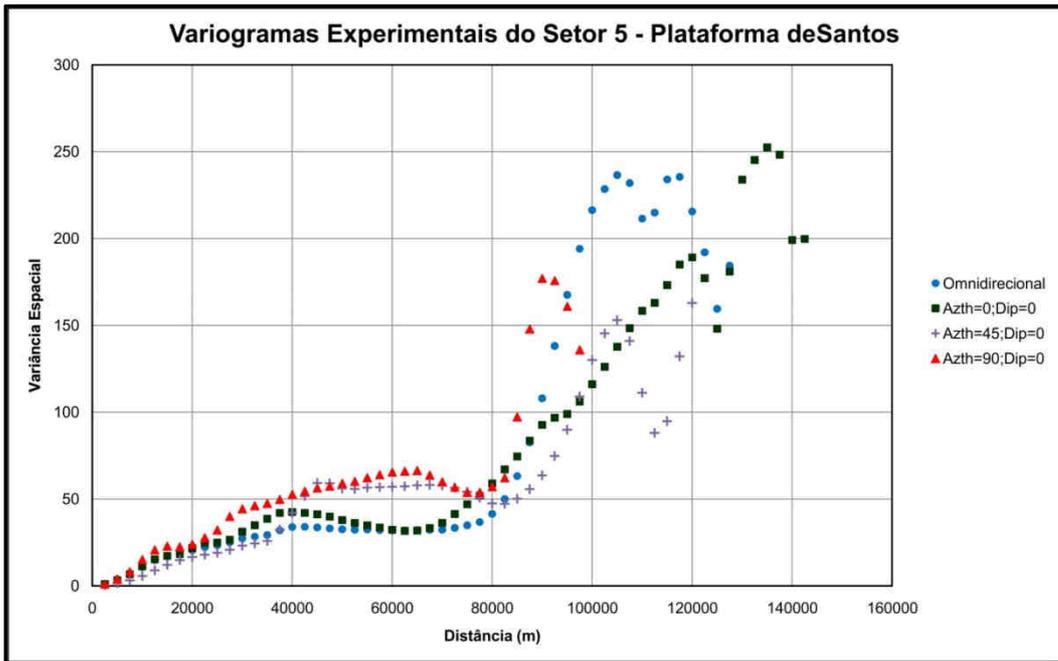


Figura 33: Variogramas experimentais para o setor 5 da plataforma de Santos.

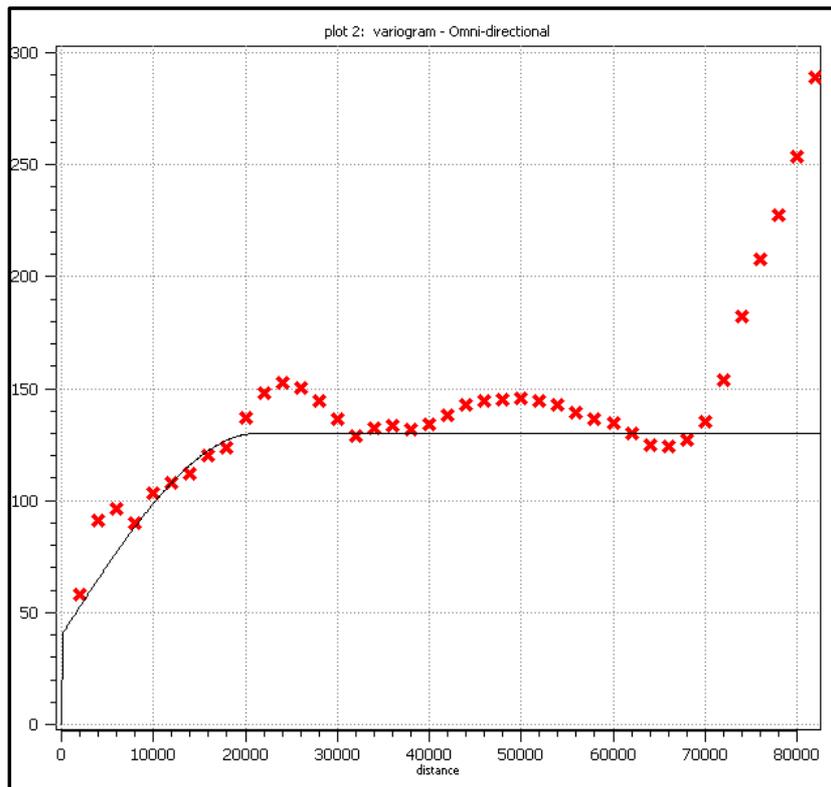


Figura 34: Variograma experimental Omni-dimensional da plataforma de Santos para o setor 5, ajustado por um modelo esférico com alcance máximo de 20.000 metros.

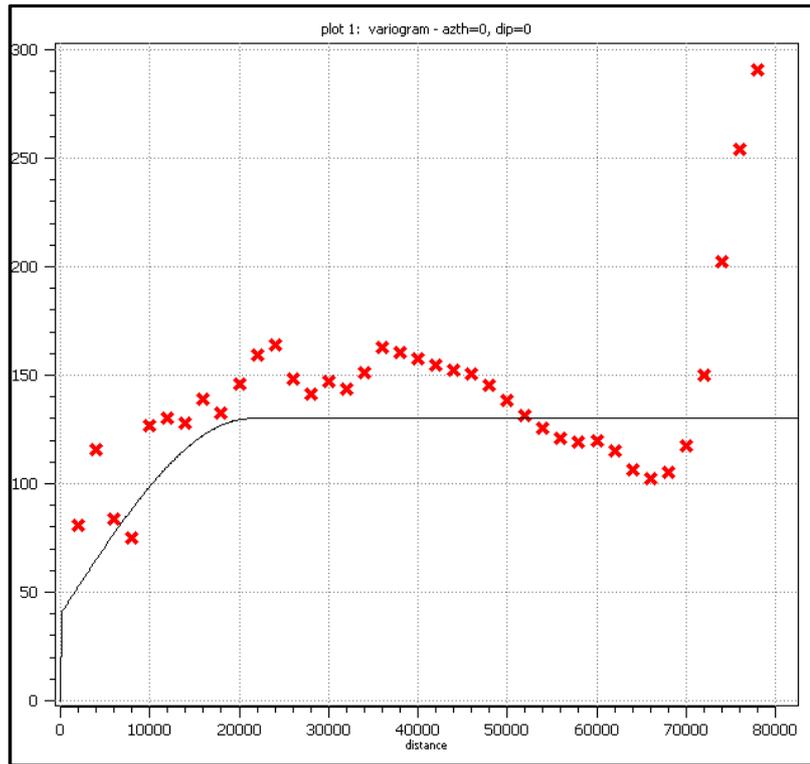


Figura 35: Variograma teórico com direção de 0° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-4 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance máximo de 20.000 m.

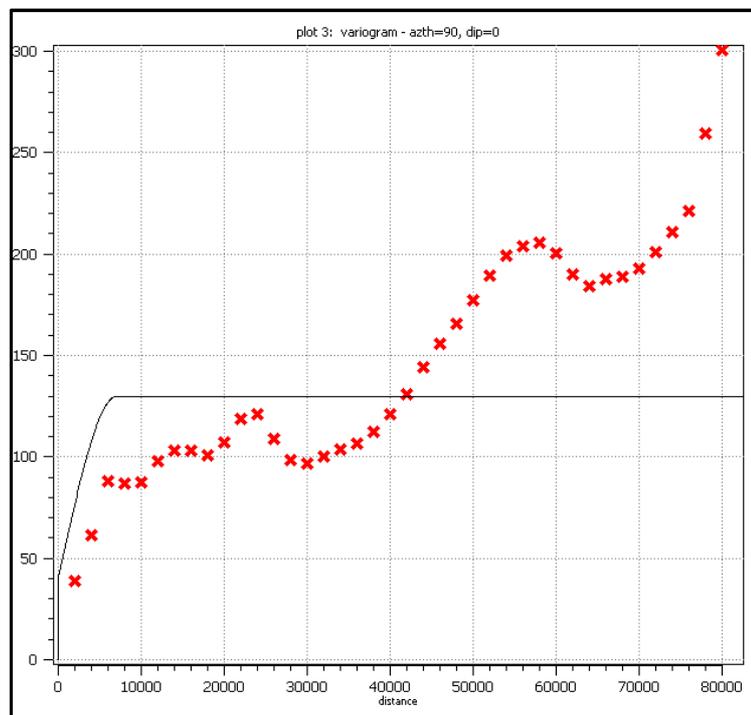


Figura 36: Variograma teórico com direção de 0° com ângulo de tolerância de 20° para o Setor-4 da Plataforma de Santos ajustado por um modelo esférico com alcance máximo de 20.000 m.

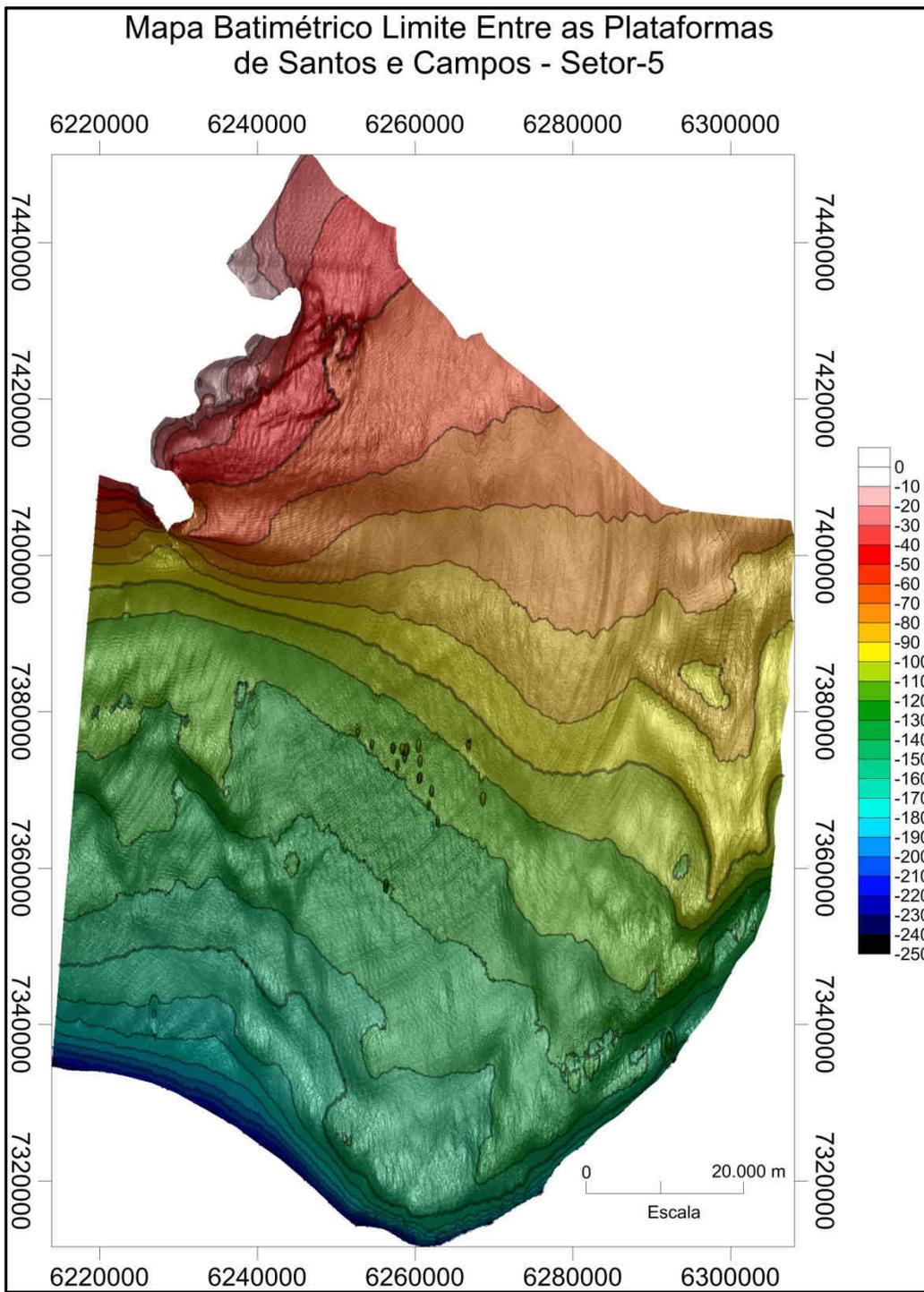


Figura 37: Mapa Batimétrico do Setor-5 resultante do processo de krigagem Em (1) observa-se o ruído modelado no processo de interpolação geoestatística; em (2) os grandes domínios Morfosedimentares.

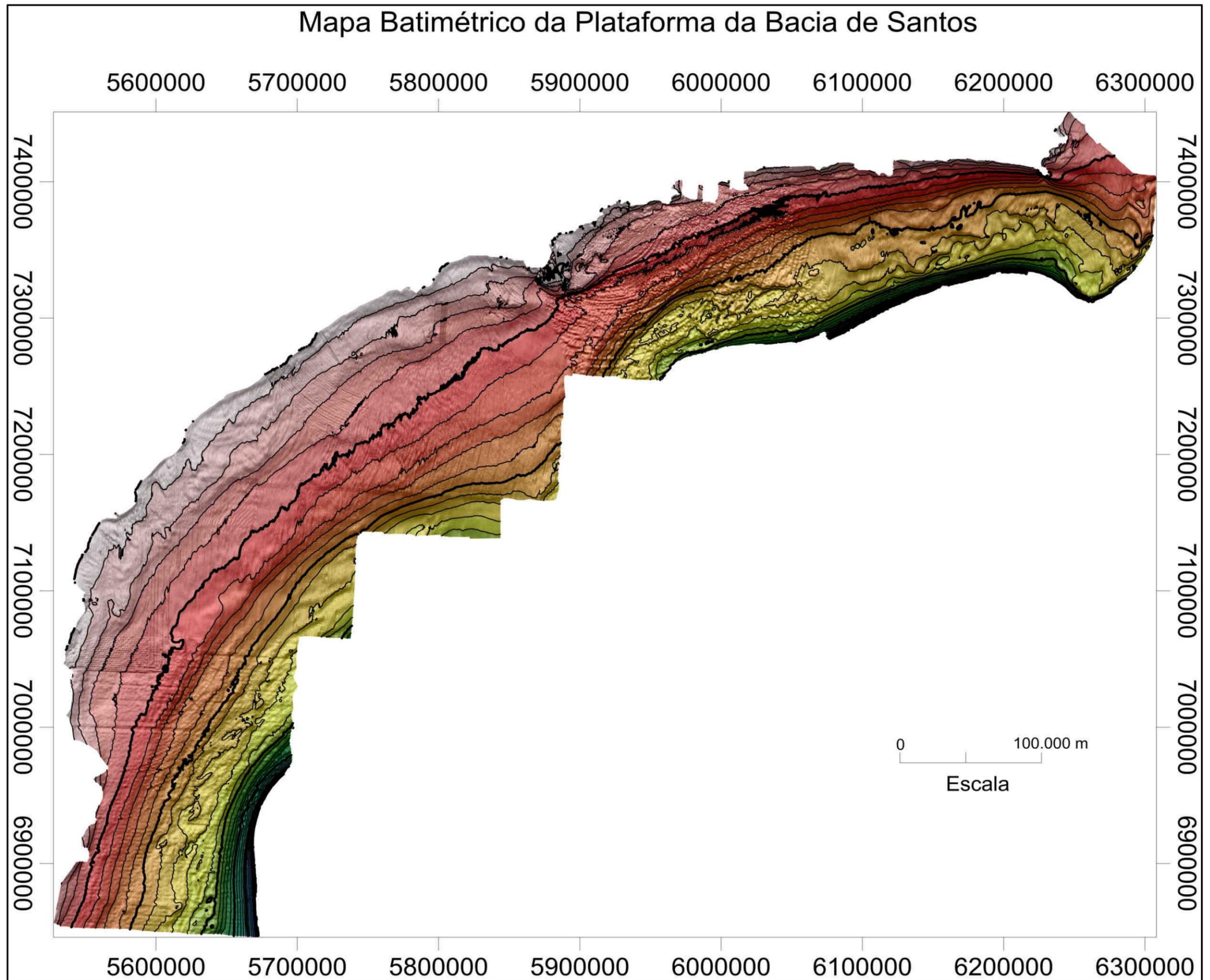


Figura 38: Mapa batimétrico da Plataforma de Santos resultante do processo de krigagem e posterior mosaicação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego da metodologia de tratamento geoestatística possibilitou a delimitação de um grande número de feições na plataforma continental de Santos, sendo muitas delas ainda inéditas na literatura. Esta melhora foi proporcionada pelo ganho de resolução espacial do dado de batimetria gerado por meio da interpolação por krigagem. Outro ponto positivo observado no método se deve a necessidade de ajuste prévio da informação em que processos preliminares como análise de densidade de distribuição amostral foram empregados para compreender melhor a distribuição de amostras bem como prever possíveis ruídos impostos no processo de krigagem subsequente. Estes por sua vez tiveram como principal propósito obedecer os princípios de estacionaridade exigidos no processo de krigagem.

Outro aspecto observado na metodologia empregada neste trabalho foi que a krigagem dos resíduos resultante do processo de remoção de tendências dos dados amostrais conseguiu capturar de maneira satisfatória uma ampla variabilidade da geomorfologia da plataforma de Santos, bem como potencializar o ruído instrumental e erros de aquisição intrínsecos aos levantamentos de batimetria. Neste caso uma sugestão para futuros trabalhos seria de aplicar filtros que possibilitem a remoção destes ruídos instrumentais, para que em uma etapa posterior o método da remoção de tendências seja aplicado.

6. FUTUROS DIRECIONAMENTOS DO TRABALHO

Com relação aos direcionamentos do presente trabalho pretende-se realizar o aprofundamento da modelagem geoestatística com o propósito de tentar extrair da morfometria uma variável que seja possível de ser correlacionada com os tipos de fácies presentes no ambiente de plataforma tais como o gradiente associando estas variáveis a amostras de areia, lama e carbonato de cálcio (CaCO_3).

7. BIBLIOGRAFIA

- ARTUSI, L. (2004). Geologia, geomorfologia e sismoestratigrafia rasa da plataforma continental ao largo da laguna de Araruama – RJ. (Dissertação Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense. 91p.
- BREHME, I. (1984). Vales Submarinos entre o banco de Abrolhos e Cabo Frio. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 116p.
- CASTAÑOS, G. X. O. (2002) Integração das imagens sonográficas e perfis batimétricos na plataforma de Regência (Bacia do Espírito Santo) – (Dissertação de Mestrado) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro.
- CORRÊA, I. C. S. (1996) Les variations du niveau de la mer Durant les dernies 17.500 ans BP: l`exemple de la plate-forme continentale du Rio Grande do Sul – Brésil: Marine Geology, v.130, p.163 – 178.
- CORRÊA, I. C. S., PONZI, V. R. A., TRINDADE, L. A. F. (1982). Níveis Marinhos Quaternários da Plataforma Continental do Rio de Janeiro. 31o Congresso Brasileiro de Geologia. p. 578-587.
- DIAS, G. T. M.; GORINI, M. A.; GALLEA, C. G.; MELLO, S. M.; DELLAPIAZA, H. (1982) Bancos de arenito de praia (beach rocks) submersos na plataforma continental SE brasileira. 32° Congresso Brasileiro de Geologia, 1540 - 1546.
- DUBREL, O. (2003) Geostatistics for seismic data integrations in earth models. SEG & EAG Distinguished Instructor Short Course, Tulsa, Okla.
- FIGUEIREDO JR, A. G. e TESSLER, M. G. (2004). Topografia e composição do substrato marinho da Região Sudeste-Sul do Brasil. São Paulo, Instituto Oceanográfico, USP. Série Documentos Revizee – Score Sul.

- FIGUEIREDO JR., A. G. e MADUREIRA, L. S. P. (2004). Topografia, composição, refletividade do substrato marinho e identificação de províncias sedimentares na região Sudeste-Sul do Brasil. São Paulo, Instituto Oceanográfico, USP. Série Documentos Revizee – Score Sul. pp.46-55.
- GUIMARÃES, A. G. (2002) Modelagem Geológica e Geoestatística do Reservatório da Bacia de Campos RJ. Rio de Janeiro – UFRJ (Dissertação de Mestrado).
- ISAAKS E. H., SRIVASTAVA M. R. (1989) An Introduction to Applied Geostatistics. New York. Oxford University Press.
- KOWSMANN R. O., COSTA M. P. A., VICALVI, M. A., COUTINHO, M. G. M., GAMBOA, L. A. P. (1977). Modelo da sedimentação holocênica na plataforma continental sul brasileira. In Projeto REMAC – Evolução sedimentar holocênica da plataforma continental e do talude do Sul do Brasil. Série Projeto REMAC: v.2, p. 7–26. Rio de Janeiro, PETROBRAS, CENPES, DINTEP.
- KOWSMANN, R. O.; VICALVI M. A.; COSTA, M. P. A (1978). Considerações sobre a sedimentação quaternária na plataforma continental entre Cabo Frio e a Foz do rio Itabapoana. Rio de Janeiro. CPRM. DGEO. REMAC. p 34.
- KOWSMANN, R.O., COSTA, M.O.A., (1979). Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. In: REMAC PROJECT (Final Report). Petrobras Rio de Janeiro. pp. 1–55.
- LOPES, A. L. M. (2004). Análise da Evolução Sedimentar Quaternária da Plataforma Continental Sul da Bacia e Campos Com Base em Estratigrafia Sísmica e Sonografia, UFF, (Dissertação Mestrado).77p.
- MACEDO, J. M. (1990). Evolução Tectônica da Bacia de Santos e Áreas Continentais Adjacentes. In: Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. G. P. Raja Gabaglia, E. J. Milani (coords.). Petrobrás. pp. 361-376.
- MAYA, R. M. C., REIS, A. T., ALVES E. C., SILVA C. G. GUERRA J.V.,GORINI C., SILVA A., ARANTES-OLIVEIRA R.. (2010) Architecture and

stratigraphy framework of shelf sedimentary systems off Rio de Janeiro State, northern Santos basin-Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*. 58.,pp 15-29.

MC DONALD, J. H. (2009) *Handbook of biological statistics*. 2nd edition. Sparky Hose Publishing, Baltimore, Maryland.

MOHRIAK, W. U. (2003) Bacias sedimentares da margem continental brasileira. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. Centro de Pesquisas em Recursos Minerais - Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. p (87-158).

MOREIRA, J. L. P., MADEIRA, C. V., GIL, J. A., MACHADO, M. A. P. (2007). Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15 (2): 531-550.

PACHECO, C. E. P. (2011) *Caracterização da morfologia da plataforma continental da bacia de Campos, RJ*. (Dissertação Mestrado) Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ.116p.

PONZI, V. R. A.; OLIVEIRA K. P.; REIS M. C. B. (1990). Evidências paleoambientais em testemunhos da plataforma continental do Rio de Janeiro. Em: 36o Congresso Brasileiro de Geologia. V.2, p. 567 – 579. Natal – RN.

PONZI, V. R. A.; OLIVEIRA K. P.; REIS M. C. B. (1990). Evidências paleoambientais em testemunhos da plataforma continental do Rio de Janeiro. Em: 36o Congresso Brasileiro de Geologia. V.2, p. 567 – 579. Natal – RN.

REMACRE, A. Z. (1999) *Introdução as Funções Aleatórias*. Campinas:[s.n]. Disponível em: <[HTTP://www.ige.unicamp.br/site/htm/19.php?local=8&docente=92](http://www.ige.unicamp.br/site/htm/19.php?local=8&docente=92)>. Acesso em: Julho 2013 (Apostila do curso de nivelamento para a disciplina de Geoestatística I, IG-UNICAMP).

- RIBEIRO JÚNIOR. P. J. (1995) Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. ESALQ (Dissertação Mestrado), Piracicaba, São Paulo.
- SIMÕES, I. C. V. P (2007) Aplicação da batimetria multifeixe para a definição da morfologia detalhada do fundo marinho ao largo da laguna de Araruama e Arraial do Cabo - RJ. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ. 122p.
- SIMÕES, I. C. V. P (2007) Aplicação da batimetria multifeixe para a definição da morfologia detalhada do fundo marinho ao largo da laguna de Araruama e Arraial do Cabo - RJ. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ. 122p.
- SOARES A. (2006) Geoestatística Para as Ciências da Terra e do Ambiente. IST Press, 2ª Edição. Lisboa – Portugal.
- VIEIRA S. R; CARVALHO J. R. P; CEDDIA M. B; GONÇALES A. P. (2010) Detrending non stationary data for geostatistical applications. *Bragantina*, Campinas V.69, 1-8p.
- WEBSTER, R.; OLIVER M. A. (2007) *Geostatistics for environmental scientists*. Second Edition. Jhon Wiley & Sons, LTD. West Sussex, England.
- WOLF, D. J.; WITHERS, K. D.; BURNAMAN M. D.(1994) Integration of Well and Seismic Data Using Geostatistics. Principles, Methods and Case Studies. In: *Stochastic Modeling and Geostatistics*. AAPG, Computer Applications in Geology. n. 3.,p.177-199.
- YAMAMOTO, J. K. (2001) Avaliação e classificação de reservas minerais. Edusp, São Paulo.
- ZEMBRUSCKI. S. G. (1979) Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. In: REMAC. PETROBRAS/ CENPES/DINTEP, Vol. 7. P. 129 – 177.