

ÍTALO OLIVEIRA FERREIRA

**COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS
BATIMÉTRICOS VISANDO A REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL
DO RELEVO SUBMERSO UTILIZANDO INTERPOLADORES
DETERMINÍSTICOS E PROBABILÍSTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

F383c
2013

Ferreira, Ítalo Oliveira, 1988-

Coleta, processamento e análise de dados batimétricos
visando a representação computacional do relevo submerso
utilizando interpoladores determinísticos e probabilísticos /

Ítalo Oliveira Ferreira. – Viçosa, MG, 2013.

xiii, 70 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Inclui apêndices.

Orientador: Dalto Domingos Rodrigues.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 63-67.

1. Mapas batimétricos. 2. Ecobatímetro. 3. Estatística.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.151

ITALO OLIVEIRA FERREIRA

**COLETA, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS
BATIMÉTRICOS VISANDO A REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL
DO RELEVO SUBMERSO UTILIZANDO INTERPOLADORES
DETERMINÍSTICOS E PROBABILÍSTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 04 de Abril de 2013.

José Luiz Portugal

Gérson Rodrigues dos Santos
(Coorientador)

Dalto Domingos Rodrigues
(Orientador)

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.*

Arthur Schopenhauer

*"Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que
entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino".*

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Principalmente a Deus por ter me concedido o dom da vida, inteligência, paciência, capacidade de crescimento e, sobretudo, persistência e coragem para sempre seguir em frente.

Aos meus pais, Geraldo Magela e Eliane, e aos meus irmãos, Danilo e Murilo, que nunca deixaram de me dar força, acreditando mais em mim do que eu mesmo e me incentivando sempre a trilhar o caminho do bem.

À toda a minha família.

Ao professor Dr. Dalto D. Rodrigues, por me orientar neste trabalho e aos meus muitos professores, em especial a Afonso P. Santos, pelo apoio constante e os muitos ensinamentos práticos e teóricos.

Aos meus Coorientadores Prof. Dr. Gérson Rodrigues dos Santos e Prof. Dr. Elpídio Inácio Fernandes Filho por me auxiliar neste estudo sempre que necessitei.

Ao Departamento de Engenharia Civil / Setor de Engenharia de Agrimensura, por ceder os equipamentos e *softwares*.

Ao corpo de bombeiros da UFV, pelo apoio no levantamento batimétrico, e a Geraldo e Cilene, funcionários do Departamento de Engenharia Civil, pela paciência com que me trataram todo este tempo.

Ao Eng. Agrimensor e de Segurança do Trabalho Sandro J. P. Paixão, diretor técnico da UMI SAN, e ao Técnico em Hidrografia Huderson R. Guinin, funcionário da UMI SAN, pelos ensinamentos práticos e teóricos sobre levantamentos batimétricos monofeixe.

Aos meus amigos de longas datas, em especial ao companheiro de república Luis Henrique, que me acompanhou na visita à empresa UMI SAN e ao Tenente da Marinha do Brasil Eng. Agrimensor Igor Fernandes, que me auxiliou nos trabalhos de campo.

Ao amigo Eng. Agrimensor Edilson pelos dias de estudo e correções sugeridas.

E a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos	16
1.1.1. Objetivos Gerais	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
1.2. Justificativas	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. Introdução aos levantamentos batimétricos	19
2.2. Movimentos de uma embarcação e seus efeitos.....	21
2.3. Integração dos sistemas utilizados em levantamentos batimétricos.....	24
2.4. Introdução ao ecobatímetro	25
2.5. Velocidade de propagação do som na água	28
2.6. Princípios físicos e geométricos relacionados ao pulso sônico.....	29
2.7. Posicionamento relativo cinemático em tempo real (RTK)	30
2.8. Controle do nível da água.....	32
2.9. Análise da precisão em levantamentos batimétricos.....	34
2.10. Métodos de interpolação.....	38
2.10.1. Geoestatística	38

2.10.2.	Inverso ponderado da distância.....	42
3.	METODOLOGIA	44
3.1.	Área de estudo.....	44
3.2.	Materiais.....	44
3.3.	Métodos.....	46
3.3.1.	Levantamentos de apoio	46
3.3.2.	Planejamento do levantamento batimétrico.....	47
3.3.3.	Execução do levantamento batimétrico.....	48
3.3.4.	Processamento e análise dos dados batimétricos.....	49
3.3.5.	Geração do modelo digital de profundidade.....	51
3.3.5.1.	Estudo sobre a utilização adequada da krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas.....	52
3.3.5.2.	Análise da qualidade da representação computacional de superfícies batimétricas utilizando os interpoladores inverso ponderado da distância e krigagem na presença de dados esparsos e abundantes	53
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1.	Coordenadas dos marcos de apoio e da referência de nível.....	55
4.2.	Levantamento topográfico planimétrico e batimétrico	55
4.3.	Análise da precisão do levantamento batimétrico.....	56
4.4.	Geração do modelo digital de Profundidade	57
4.4.1.	Estudo sobre a utilização adequada da krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas.....	57
4.4.2.	Análise da qualidade da representação computacional de superfícies batimétricas utilizando os interpoladores inverso ponderado da distância e krigagem na presença de dados esparsos e abundantes	52
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

APÊNDICE A - Histograma da análise das linhas de verificação	68
APÊNDICE B – Modelo Digital de Profundidade	69
ANEXO A – Especificações da IHO para Levantamentos Hidrográficos. Fonte: Adaptado de IHO, 2008).....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Os movimentos de uma embarcação (Fonte: PAULO e HOLMES, 2011).	22
Figura 2. Esquema de funcionamento da batimetria em tempo real (Fonte: Dias, 2010).	31
Figura 3. Semivariograma. (Fonte: Adaptado de Silveira , 2010).....	40
Figura 4 – Área de estudo / Vista parcial do Campus da UFV.	44
Figura 5 - Linha planejada e executada e o perfil do fundo da lagoa.....	50
Figura 6 - Semivariograma isotrópico experimental e modelo ajustado.	58
Figura 7 - MDP construído com base na krigagem ordinária <i>default</i>	59
Figura 8 - Mapa de incertezas das estimativas de profundidade construído com base na krigagem ordinária <i>default</i>	59
Figura 9 - Distribuição de frequências da variável profundidade (Z) da batimetria do represamento do Ribeirão São Bartolomeu.	47
Figura 10 - Gráfico mostrando a tendência de segunda ordem presente nos dados.....	48
Figura 11 - Semivariogramas experimentais direcionais e modelos ajustados das direções: N-S (0°), E-W (90°), SW-NE (45°) e NW-SE (135°).....	49
Figura 12 - Semivariograma omnidirecional experimental e modelo ajustado.....	50
Figura 13 - MDP construído com base na krigagem universal.	51
Figura 14 - Mapa de incertezas das estimativas de profundidade construído com base na krigagem universal.	51
Figura 15 - Gráfico mostrando a tendência de segunda ordem presente nos dados do GRID1.	53
Figura 16 - Gráfico mostrando a tendência de segunda ordem presente nos dados do GRID2.	53
Figura 17 - Gráfico mostrando a tendência de segunda ordem presente nos dados do GRID2.	54
Figura 18 - Semivariograma omnidirecional experimental e modelo ajustado para o GRID1.....	55

Figura 19 - Semivariograma omnidirecional experimental e modelo ajustado para o GRID2.55	
Figura 20 - Semivariograma omnidirecional experimental e modelo ajustado para o GRID3.56	
Figura 21 - Gráfico Expoente x RMS_d	56
Figura 22 - MDP construído com base no IQD.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Constantes para o cálculo do IVT_{Max}	36
Tabela 2. Coordenadas planimétricas da VICO, M0 e M1.	55
Tabela 3. Altitude ortométrica da RN, M0 e NR.	55
Tabela 4. Erros cometidos no levantamento topográfico planialtimétrico.....	55
Tabela 5. Incerteza Vertical Total máxima para cada ordem.	57
Tabela 6. Volume estimado de água e de lama fluídica.	57
Tabela 7. Estatística descritiva da batimetria do represamento do Ribeirão São Bartolomeu.	59
Tabela 8 – Principais estatísticas da validação cruzada.	50
Tabela 9 - Informações estatísticas das profundidades do represamento do ribeirão são Bartolomeu.	52
Tabela 10 - Modelos teóricos de semivariograma.....	55
Tabela 11 - Principais estatísticas da validação cruzada.	57
Tabela 12 - Volumes calculados para cada interpolador e GRID amostral.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC - *Alternating current*

ANA - Agência Nacional de Águas

cm - *Centímetros*

CONFEA - Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia

DC - *Direct Current*

DGPS - *Differential Global Position System*

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação

DOP - *Dilution of precision*

FM - *Frequency Modulation*

GNSS - *Global Navigation Satellite System*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IHO - *International Hydrographic Organization*

IQD - Inverso do Quadrado da Distância

IVT - Incerteza Vertical Total

KHz - Quilohertz

Km - Quilômetros

LAT - *Lowest Astronomical Tide*

m - Metros

m/s - Metros por segundo

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDP - Modelo Digital de Profundidade

min - Minutos

MLWS - *Mean Lower Water Springs*

mm - Milímetros

mm/Km - Milímetros por quilômetro

ms - Milissegundos

NBR - Norma Brasileira

NR - Nível de Redução

°C - Graus Celsius

ppm - Partes por milhão

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RN - Referência de Nível

RTK - *Real Time Kinematic*

s - Segundos

SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto

SIRGAS 2000 - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas - 2000

UFV - Universidade Federal de Viçosa

UHF - *Ultra High Frequency*

USB - *Universal Serial Bus*

UTC - *Universal Time Coordinate*

UTC - Universal Time Coordinate

UTM - Universal Transversa de Mercator

V - Volts

W - *Watts*

WGS-84 - *World Geodetic System – 1984*

RESUMO

FERREIRA, Italo Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Abril de 2013. **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos visando a representação computacional do relevo submerso utilizando interpoladores determinísticos e probabilísticos.** Orientador: Dalto Domingos Rodrigues. Coorientadores: Gérson Rodrigues dos Santos e Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Mais de 80% do comércio internacional é transportado por vias aquáticas e no Brasil não é diferente. Somente esta afirmação já poderia ser suficiente para justificar qualquer estudo relativo à área de Geodésia Marinha. Contudo, principalmente no Brasil, o conhecimento a cerca dos relevos submersos ainda é escasso. Tal conhecimento é adquirido através de levantamentos batimétricos, foco deste trabalho. A metodologia exposta abrange todas as etapas de realização de um levantamento batimétrico monofeixe, totalmente automatizado: coleta dos dados aplicando um ecobatímetro de duas frequências e técnica RTK (*Real Time Kinematic*), o processamento, a análise dos dados e a geração do Modelo Digital de Profundidade (MDP) de um represamento do Ribeirão São Bartolomeu localizado no campus da UFV. No trabalho são utilizados métodos de topografia e batimetria para a aquisição de dados sobre o relevo do local e da profundidade do represamento. Estes foram processados e analisados para a posterior geração do MDP utilizando interpoladores determinísticos e probabilísticos. No que concerne à modelagem tridimensional do relevo submerso foram realizados estudos visando quantificar os erros cometidos na modelagem através da krigagem automática e comparar a eficiência da krigagem e do inverso ponderado da distância em diferentes GRIDs amostrais. Foi possível constatar que os levantamentos batimétricos apresentam características ideais para a aplicação da Geoestatística. Como resultados principais verificou-se que a Krigagem sistemática, realizada pelo analista respeitando-se todos os pressupostos exigidos pela mesma, representou a batimetria local de forma mais acurada comparativamente aos outros métodos estudados. Através deste trabalho também foi possível obter uma estimativa do volume de água do reservatório e de lama fluídica depositada no fundo submerso.

ABSTRACT

FERREIRA, Italo Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2013. **Collection, processing and analysis of bathymetric data for to computational representation of relief submerged using deterministic and probabilistic interpolators.** Adviser: Dalto Domingos Rodrigues. Co-advisers: Gérson Rodrigues dos Santos and Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Over 80% of international trade is transported by waterways and Brazil is no different. Only this statement might already be sufficient to justify any study on the area of marine geodesy. However, especially in Brazil knowledge about the reliefs submerged is still scarce. Such knowledge is acquired through bathymetric surveys, focus of this work. The methodology exposed covers all stages of realization of a singlebeam bathymetric survey, fully automated: data collection by applying a dual frequency echo sounder and technical RTK (Real Time Kinematic), processing, data analysis and generation Model Digital Depth (MDP) of an impoundment of Ribeirão São Bartolomeu located on the campus of UFV. At work methods are used for topography and bathymetry data acquisition on the relief of the site and the depth of the impoundment. These were processed and analyzed for the subsequent generation of MDP using deterministic and probabilistic interpolators. Regarding the three-dimensional modeling of the relief submerged studies have been performed to quantify the errors in the modeling through automatic kriging and compare the efficiency of kriging and inverse distance weighted in different sampling grids. It was found that the bathymetric surveys have ideal characteristics for the application of geostatistics. As main results verified that the Kriging systematically conducted by the analyst respecting all the conditions required by it, the bathymetry location represented more accurately compared to other methods studied. Through this work it was also possible to obtain an estimate of the volume of water and sludge reservoir fluidly deposited on the submerged bottom.

1. INTRODUÇÃO

Desde meados do século XIX, navegantes tem tentado melhorar seus conhecimentos sobre o fundo marinho. Na atualidade, este estudo é necessário em obras portuárias, tanto na construção de novos portos como na dragagem dos mesmos; na locação de gasodutos e cabos telefônicos transoceânicos; na exploração de petróleo e outros recursos minerais; na preservação ambiental; em atividades de pesquisa; no acompanhamento de processos de erosão ou assoreamento e, sobretudo, na navegação (IHO, 2005; SÁNCHEZ, 2010).

Para realizar os procedimentos de análise, elaboração e implantação destes estudos é indispensável o uso de modelos digitais de profundidade (MDP). Estes consistem em uma representação matemática computacional da distribuição da profundidade que ocorre dentro de certa região. Os MDPs permitem desde a simples visualização tridimensional do relevo submerso até análises mais complexas, como cálculos de volumes, criação de projetos e geração de mapas de declividade (FELGUEIRAS, 1998). As profundidades dos corpos aquáticos, indispensáveis na construção dos MDPs, são obtidas através dos levantamentos batimétricos.

Historicamente a batimetria era realizada através de métodos relativamente simples, porém demorados e pouco precisos, utilizava-se de varas de sondar e fios de prumo para a medição direta da profundidade, enquanto que a embarcação era posicionada através de medidas tomadas a partir de um ponto de apoio em terra através de relações geométricas simples (RAMOS, 2010).

Com o avanço das ciências e da tecnologia, principalmente com o advento das técnicas espaciais, novos equipamentos e métodos foram sendo desenvolvidos. Atualmente os levantamentos batimétricos são realizados a bordo de embarcações de pequeno, médio ou grande porte, utilizando-se de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para o posicionamento planimétrico, de ecobatímetros para medição de profundidades numa alta taxa de amostragem e de sensores inerciais, quando necessário, para as correções a serem feitas nas sondagens devido aos movimentos da embarcação (IHO, 2005).

O estado da arte dos equipamentos de medição de profundidade consiste na utilização de ecobatímetros monofeixe (*singlebeam*) e multifeixe (*multibeam*) a bordo de embarcações de sondagem (IHO, 2005). Existe também uma enorme tendência em se utilizar o sensoriamento remoto para a obtenção estimada de profundidades em águas rasas (BORGES, 2004; KRUG e NOERNBERG, 2005; RIBEIRO, 2008) e ainda sistema de sondagem laser aerotransportados (*lidar*) (IHO, 2005).

Os ecobatímetros monofeixe emitem apenas um pulso acústico (*ping*), determinando assim uma única cota de profundidade por ciclo. Estes equipamentos são derivados dos sonares militares, e em águas rasas atingem uma precisão subdecimétrica. Os sistemas multifeixe apresentam um rápido desenvolvimento e oferecem um enorme potencial para medição de profundidade, tendo em vista sua capacidade de mapear uma grande área submersa em uma única varredura, proporcionando desta forma uma cobertura total do fundo. Os sistemas *lidar* também são capazes de cobrir a maior parte do fundo submerso, porém apresentam boas condições de operação somente em águas lípidas e com até 50 m de profundidade (IHO, 2005)

Apesar da crescente evolução tecnológica, os ecobatímetros monofeixe ainda são os equipamentos mais utilizados no mundo inteiro (IHO, 2005). O produto resultante deste tipo de levantamento é uma malha de pontos amostrais, e para a representação da profundidade de forma espacialmente contínua é necessário o uso de interpoladores para estimar o valor da profundidade em locais não amostrados (CAMARGO, 1998).

Diversos são os métodos de interpolação, dos quais pode-se citar a triangulação, o inverso da distância (ponderada ou não) e o vizinho mais próximo. Entretanto, tais métodos possuem limitações na representação da variabilidade espacial, porque são baseados em métodos onde se supõe independência espacial entre as amostras ou distribuição espacial aleatória (VIEIRA, 2000) e se desconsidera a anisotropia¹ e a continuidade do fenômeno observado (CAMARGO, 1998).

Dessa forma a variabilidade espacial da maioria dos fenômenos naturais não pode ser mapeada por simples funções matemáticas. Neste sentido, tem-se aplicado largamente a Geoestatística (krigagem).

¹ Característica que determinado fenômeno possui de variar conforme a direção em que é observado.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Gerais

Mediante ao exposto, o presente trabalho objetiva realizar estudos na área de levantamentos batimétricos monofeixe, coletando, processando e analisando os dados de profundidade para posterior representação computacional das superfícies através de interpoladores determinísticos e probabilísticos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Montar o sistema de levantamentos batimétricos monofeixe disponível na Universidade Federal de Viçosa;
- Adquirir conhecimentos sobre a metodologia de coleta, processamento e análise de dados batimétricos utilizando o *software Hypack 2010*;
- Adquirir conhecimentos sobre formas e métodos de representação computacional de superfícies tridimensionais, em especial, superfícies batimétricas.
- Quantificar os erros cometidos ao se aplicar a krigagem pelo auto-ajuste, em processos de levantamentos batimétricos, e
- Analisar, comparativamente, a eficiência da krigagem e do inverso ponderado da distância na representação computacional de superfícies batimétricas, em diferentes GRIDs amostrais.

1.2. Justificativas

O levantamento batimétrico é uma técnica de mapeamento em ascensão no mercado e com grandes perspectivas de investimentos, que necessita do desenvolvimento de novas tecnologias, pesquisas e profissionais competentes no assunto.

A correta realização de levantamentos batimétricos requer um grande conhecimento pelo profissional do meio físico, da acústica dos corpos aquáticos, dos diversos equipamentos utilizados e das normas e procedimentos adequados (IHO, 2005).

Sendo assim, este tipo de levantamento abrange as diversas áreas de conhecimento do Engenheiro Agrimensor e Cartógrafo, dentre as quais podemos citar a física, hidrologia,

topografia, geodésia, cartografia, ajustamento de observações, desenho assistido por computador e métodos computacionais de representação cartográfica.

No que compete a representação computacional das superfícies encontram-se na literatura diversas opções para a interpolação de dados pontuais, tais como os dados batimétricos provenientes de levantamentos monofeixe.

Conforme supracitado, atualmente têm-se aplicado largamente o interpolador geoestatístico krigagem. A principal diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação está na maneira como a ponderação é atribuída às diferentes amostras. Na krigagem, os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Sendo assim, o semivariograma é a ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, pois permite modelar a dependência espacial entre as amostras (CAMARGO, 1998). Antes de interpolar, usando a krigagem, é necessário ajustar uma função ao semivariograma experimental, visando estimar os parâmetros da dependência espacial. Para efetuar a krigagem esses parâmetros precisam ser estimados com precisão e, dessa forma, se o modelo for ajustado de forma inapropriada, a krigagem conterà erros de estimação que fornecerão informações distorcidas do fenômeno em questão.

Portanto, o ajuste de semivariograma é uma fase crucial na análise Geoestatística e deve receber uma atenção especial (VILELA, 2004). O procedimento de ajuste não deve ser direto e/ou automático, mas sim interativo, pois neste processo o analista deve verificar a adequação do modelo ao semivariograma experimental. Caso seja necessário, o ajuste deve ser refeito (CAMARGO, 1998). Porém, com a popularização do geoprocessamento, foram desenvolvidos diversos *softwares* que realizam este ajuste automaticamente, comprometendo o resultado final, pois, além dos parâmetros geralmente utilizados para apontar a qualidade do ajuste, as características da área e do estudo só podem ser avaliadas por um especialista (VILELA, 2004).

Devido a complexidade em se aplicar o interpolador krigagem da forma correta, muitos optam por utilizar a krigagem pelo auto-ajuste ou ainda aplicam interpoladores determinísticos. Porém, como é sabido, os métodos determinísticos possuem limitações na representação da variabilidade espacial. Autores, como por exemplo, Tabios e Salas (1985), Laslett *et al.* (1987) e Warrick *et al.* (1988) realizaram estudos comparando métodos

probabilísticos e determinísticos, em especial, a Krigagem e o Inverso Ponderado da Distância.

Apesar da vasta utilização destes interpoladores, encontram-se muitas divergências em publicações sobre a escolha e utilização dos mesmos. Estudos feitos por Kravchenco e Bullock (1999), demonstraram que a krigagem faz uma descrição mais acurada da estrutura espacial do fenômeno estudado, porém o interpolador inverso ponderado da distância é mais simples de aplicar e demanda menos tempo. Melhores resultados para a krigagem, quando comparados com o método do inverso ponderado da distância, foram constatados também por Tabios e Salas (1985), Laslett *et al.* (1987) e Warrick *et al.* (1988). Entretanto, Kanegae Júnior *et al.* (2006), Wollenhaupt *et al.* (1994) e Gotway e Hartford (1996) demonstraram ser o inverso ponderado da distância mais eficiente que a krigagem. Silva *et al.* (2008) e Souza *et al.* (2010) não encontraram grandes diferenças ao compararem estes métodos.

Tais divergências podem estar diretamente relacionadas com a quantidade de pontos amostrais. De acordo com Burrough *apud* Camargo (1998) quando os dados são abundantes a maior parte dos métodos de interpolação produz resultados praticamente idênticos, porém quando se dispões de dados esparsos, como no caso de levantamentos topobatimétricos, os métodos determinísticos podem gerar predições imprecisas.

No que compete a representação gráfica de superfícies batimétricas optou-se por dividir este estudo em dois tópicos. No primeiro buscou-se quantificar os erros cometidos ao se aplicar a krigagem pelo auto-ajuste (denominado *default*, muito comum nos *softwares* de geoprocessamento), em especial a krigagem ordinária, ignorando os procedimentos que antecedem uma interpolação, tais como, análise exploratória dos dados, análise variográfica e modelagem do semivariograma, em processos de levantamentos batimétricos.

No segundo tópico objetivou-se analisar, comparativamente, a eficiência da krigagem e do inverso ponderado da distância na representação computacional de superfícies batimétricas, variando de forma decrescente a quantidade de pontos amostrais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Introdução aos levantamentos batimétricos

No Brasil a produção e manutenção das cartas náuticas, assim como a execução e o controle dos levantamentos hidrográficos, são atribuições da Marinha do Brasil, através da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação). A Marinha do Brasil também é responsável por estabelecer normas técnicas concernentes às cartas náuticas de qualquer escala. Tais normas são elaboradas segundo padrões internacionais de qualidade recomendados pela *IHO* (*International Hydrographic Organization*), organismo intergovernamental fundado em 1921 por 19 países, incluindo o Brasil.

O CHN (Centro de Hidrografia da Marinha) é o órgão responsável pelo planejamento e pela validação dos dados resultantes dos levantamentos hidrográficos destinados à construção das cartas náuticas sob a responsabilidade da DHN e aqueles de interesse da Marinha.

Além dos levantamentos executados pela Marinha, o CHN fiscaliza, por força de determinação legal, a execução dos levantamentos hidrográficos executados por entidades extra Marinha, visando, principalmente, manter as cartas náuticas brasileiras atualizadas. As diretrizes para controle dos Levantamentos Hidrográficos estão definidas na NORMAM – 25.

O levantamento batimétrico é uma das principais tarefas de um levantamento hidrográfico. É através dele que se obtêm as profundidades, indispensáveis na representação do relevo submerso.

As profundidades podem ser obtidas de forma direta com uso de prumo de mão, máquina de sondar e estadias ou de forma indireta, com uso de ecobatímetros monofeixe e/ou multifeixe. Existe também uma enorme tendência em se utilizar o sensoriamento remoto para a obtenção estimada de profundidades em águas rasas (BORGES, 2004; KRUG E NOERNBERG, 2005; RIBEIRO, 2008) e ainda sistema de sondagem laser aerotransportados (IHO, 2005).

Apesar da crescente evolução tecnológica vivenciada atualmente, os levantamentos batimétricos monofeixe ainda são a técnica mais utilizada no mundo inteiro (IHO, 2005). Tais levantamentos são realizados a bordo de embarcações utilizando-se de ecobatímetros

monofeixe para medição de profundidades numa alta taxa de amostragem e de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) para o posicionamento planimétrico diferencial (IHO, 2005). No meio náutico é necessário utilizar, além dos equipamentos citados, um compensador de ondas.

À primeira vista o levantamento batimétrico pode parecer semelhante ao levantamento topográfico terrestre, porém, essa semelhança se limita a representação por linhas de igual cota e o tratamento computacional das superfícies. Os procedimentos seguidos na coleta dos dados são diferentes dos usados na topografia terrestre (SÁNCHEZ, 2010). Na topografia a superfície a ser levantada é visível, sendo assim, os pontos de mudança de declividade podem ser facilmente localizados e levantados. Além disso, é possível materializar pontos estáveis de observação (marcos) e efetuar medições repetidas, para um posterior ajustamento de observações.

Um levantamento batimétrico começa muito antes da fase de coleta de profundidades. É necessário decidir sobre alguns elementos, como por exemplo, a área exata do levantamento, os apoios de campo necessários, os equipamentos disponíveis e a escala do levantamento para satisfazer os requisitos pretendidos. Este último é talvez o elemento mais importante na fase que antecede as medições, tendo influência direta na precisão mínima com que elas devem ser coletadas e a quantidade de detalhes a serem representados. Quando se decide sobre a escala adotada deve-se ter consciência que a mesma é função do prazo requerido e dos recursos disponíveis, da finalidade da batimetria e da complexidade do relevo submerso (IHO, 2005). O critério adotado pela DHN para a escolha da escala de levantamento é o mesmo adotado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), é função da precisão que se deseja obter e do erro de graficismo máximo permitido na carta (0,2 mm). A escala com a qual se pretende confeccionar a carta náutica (escala de representação do levantamento) deve ser sempre menor ou igual à escala de levantamento (MARTINI, 2007).

Na batimetria monofeixe a superfície a ser mapeada deve ser dividida em uma malha de linhas equidistantes² de maneira conveniente para que sirva de diretriz para o levantamento. Essas linhas são chamadas de linhas regulares de sondagem e podem ser paralelas, circulares, radiais ou em ziguezague. Para se obter um melhor traçado das curvas isobatimétricas deve-se levar em conta a orientação das linhas, estas no caso de áreas marítimas ou lagos devem ser

²Lê-se “faixas” para os sistemas multifeixe ou sistemas laser aerotransportados (IHO, 2005).

aproximadamente perpendiculares a costa ou a margem e, no caso de rios ou canais, devem ter um sentido perpendicular ao talvegue do rio ou ao eixo do canal (MARTINI, 2007). A DHN recomenda adotar linhas de sondagem regulares dispostas de modo perpendicular às linhas isobatimétricas da área. Neste último caso deve-se conhecer previamente o relevo local.

O afastamento³ entre as linhas regulares de sondagem, segundo as normas da IHO, recomendadas pela DHN, varia de acordo com a ordem do levantamento e são especificados no Anexo A (IHO, 2008). Essa distância pode ser diminuída quando o fundo submerso for muito irregular. Quando não é possível seguir a linha planejada por alguma obstrução ou mesmo por imperícia do timoneiro, ocorrem clarões na área sondada, também chamados de “feriados”. Segundo Martini (2007) têm-se adotado como tolerância para os feriados o valor de 1 mm na escala de levantamento. Após o levantamento, se for constatado algum “feriado” é necessário refazer a sondagem nos referidos locais.

Em levantamentos batimétricos, dependendo das condições do leito submerso, pode-se obter uma estimativa da precisão do levantamento através de linhas de verificação que cruzam as linhas regulares de sondagem, de preferência, ortogonalmente. O intervalo entre as linhas de verificação deve ser em torno de 10 vezes o intervalo adotado para as linhas regulares de sondagem, sendo que a DHN adota um intervalo de até 15 vezes (MARTINI, 2007). A qualidade do levantamento também pode ser avaliada através de um balanço dos erros, não correlacionados entre si, do sistema de sondagem utilizado. Esta verificação é realizada antes do levantamento e permite verificar se o sistema utilizado é capaz de alcançar os requisitos mínimos de qualidade, determinados pela IHO (ver seção 2.9) (IHO, 2005).

2.2. Movimentos de uma embarcação e seus efeitos

Uma embarcação possui seis movimentos a serem considerados durante a sondagem, compostos por três translações e três rotações ao longo dos três eixos coordenados. Esses movimentos são descritos segundo um sistema local e tridimensional de coordenadas cartesianas com origem, preferencialmente, no centro de massa da embarcação na altura da lâmina d’água estática, sendo seus eixos e movimentos assim definidos (Figura 1):

Os eixos são:

³Lê-se “distância entre os limites externos” para os sistemas multifeixe ou sistemas laser aerotransportados (IHO, 2005).

- *X*: eixo ao longo da embarcação, sendo positivo no sentido de sua navegação;
- *Y*: eixo transversal à embarcação, sendo positivo no sentido de bombordo (à esquerda do sentido de navegação), e
- *Z*: eixo vertical, positivo para o alto da embarcação.

As translações são:

- *Surge*: translação ao longo do eixo longitudinal (*X*) da embarcação de sondagem;
- *Sway*: translação ao longo do eixo transversal (*Y*) da embarcação, e
- *Heave*: translação no eixo vertical (*Z*) da embarcação.

As rotações são:

- *Roll*: rotação em torno do eixo longitudinal da embarcação;
- *Pitch*: rotação em torno do eixo transversal da embarcação, e
- *Yaw*: rotação em torno do eixo vertical da embarcação.

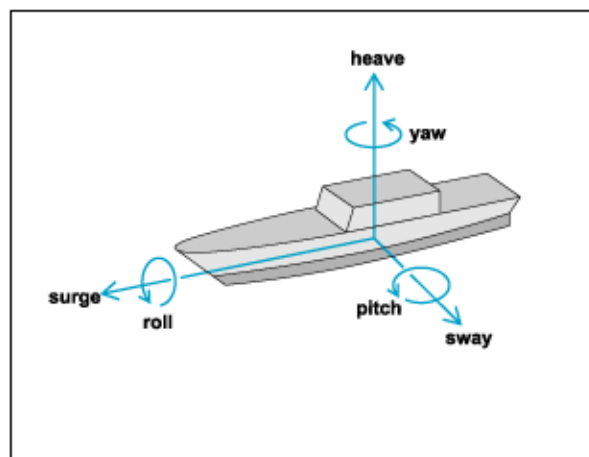


Figura 1. Os movimentos de uma embarcação (Fonte: PAULO e HOLMES, 2011).

Dentre os seis movimentos a qual uma embarcação está sujeita, em batimetria interessam-nos as três rotações (*roll*, *pitch* e *yaw*), que descrevem a atitude da embarcação de sondagem, e a translação no eixo vertical (*heave*). O *yaw* é comumente conhecido com *heading* (rumo). Estes movimentos podem ser determinados através de sensores inerciais e sensores de proa (geralmente girobússolas ou agulha *fluxgate*) ou ainda sensores inerciais com integração de informação GNSS. Os sensores inerciais aplicam as leis de movimento de

Newton⁴ e são compostos por giroscópios e acelerômetros. Os acelerômetros são usados para medir as acelerações do centro de massa da embarcação, fornecendo assim as forças que agem sobre o mesmo. Os giroscópios são empregados para determinar as rotações em torno deste centro de massa e, por conseguinte, permitem analisar a situação de equilíbrio da embarcação. Os sensores inerciais são geralmente empregados em batimetria para determinação do *roll*, *pitch* e *heave* e quando utilizados devem ser instalados, logicamente, no centro de massa da embarcação de sondagem (IHO, 2005; SIMÕES, 2007).

As rotações *roll* e *pitch*, medidas pelos sensores inerciais, são significativas na batimetria monofeixe somente quando estes ângulos forem superiores à metade da largura do feixe acústico emitido pelo transdutor. Sendo assim, dependendo das condições do ecobatímetro, da profundidade e da meteorologia local estas rotações poderão ser desconsideradas (IHO, 2005).

Dentre todos os efeitos que provocam deslocamentos verticais o efeito *heave* é o dominante, podendo chegar a 0,20 m. Este pode ser medido, como supracitado, por sensores inerciais ou ainda por compensadores de ondas. Quando for utilizado um compensador de ondas, este deve ser fixado na vertical do transdutor para medir o efeito *heave* de forma efetiva. Na indisponibilidade de sensores inerciais ou compensadores de ondas, é necessário realizar uma filtragem manual. Neste caso é necessário prática e conhecimento do comportamento da topografia submersa (IHO, 2005; RAMOS, 2007).

A rotação em torno do eixo *Z* (*yaw/heading*), também conhecido como proa, é usualmente obtida através de duas antenas GNSS instaladas numa linha base e orientadas longitudinalmente à proa da embarcação de sondagem, dois receptores GNSS e uma unidade de integração da informação. Esse método produz uma precisão superior à dos sensores de proa. A determinação do *yaw* é de extrema importância em levantamentos multifeixe. Já nos levantamentos com feixe simples, desde que a antena GNSS usada no posicionamento esteja instalada de forma centrada em relação ao transdutor, as variações do *yaw* não são significativas. Quando não é possível alinhar a antena GNSS e o transdutor de forma centrada na vertical, é necessário corrigir os dados do efeito do *yaw* para garantir a perfeita correlação entre a sondagem e o posicionamento da embarcação (ARTILHEIRO *et al.*, 2004; IHO, 2005).

⁴Sir Isaac Newton (1643-1727)

2.3. Integração dos sistemas utilizados em levantamentos batimétricos

Dentre os sistemas utilizados em levantamentos batimétricos destacam três principais: o sistema de posicionamento (GNSS), o sistema acústico e o sistema inercial. Para evitar a introdução de erros sistemáticos nas observações, os sistemas devem estar alinhados corretamente. O alinhamento entre os sistemas pode ser dividido em duas partes: o alinhamento absoluto, alinhamento dos sistemas em relação à origem; e o alinhamento relativo, alinhamento dos sistemas entre si (RAMOS, 2007).

O alinhamento absoluto refere-se à forma com que os sistemas estão dispostos na embarcação de sondagem. Nas pequenas embarcações, por exemplo, instala-se a antena GNSS usada para o posicionamento das sondagens na vertical do transdutor, visando à redução do modelo matemático de correção dos erros de posicionamento. Nas médias e grandes embarcações, isso não é possível, devido às obstruções e, na maioria das vezes, presença de grande massa metálica, que podem ocasionar interferência no sinal GNSS e efeitos de multicaminhamento. Para contornar este fato, a antena GNSS usada para o posicionamento das sondagens é instalada nas partes mais altas da embarcação. Essa configuração gera vetores entre a antena GNSS e o transdutor, chamados de *offsets*. Também são gerados *offsets* nos casos em que o sensor inercial não coincide com o centro de massa da embarcação de sondagem. Os *offsets* devem ser medidos com uma boa precisão para a correta correlação dos dados e referenciados à mesma origem. Esta origem varia de acordo com os sistemas que serão utilizados na sondagem (IHO, 2005; HYPACK, 2010).

Em levantamentos monofeixe quando não se utiliza um sensor inercial, a origem pode ser o transdutor na altura da linha d'água estática. Quando se utiliza um sensor inercial, seja em levantamentos multifeixe ou monofeixe, o ideal é que a origem seja o próprio sensor inercial, posicionado sobre o centro de massa da embarcação de sondagem (HYPACK, 2010).

O alinhamento relativo está associado aos erros de sincronismo entre os sistemas, em função da latência⁵ entre os sensores e diferenças entre as marchas dos relógios⁶ dos sistemas de posicionamento por satélite, acústico e inercial (RAMOS, 2007).

⁵Diferença entre os tempos de processamento das observações e a saída dos dados para os sistemas de aquisição automática (RAMOS, 2007).

⁶Taxa de variação do estado do relógio (MÔNICO, 2007).

A latência é minimizada por calibrações realizadas antes dos levantamentos, através do *Patch* teste⁷ ou testes de latência. Já a diferença de marcha dos relógios é compensada utilizando para a sincronização o tempo UTC (*Universal Time Coordinate*) fornecido pelo GNSS. O *Patch* teste também fornece os ângulos de montagem dos sensores, importantíssimos em levantamentos multifeixe. (IHO, 2005; RAMOS 2007; HYPACK, 2010).

2.4. Introdução ao ecobatímetro

O principal equipamento utilizado nas medições de profundidade sob a água é o ecobatímetro. Este equipamento permite a medição de profundidade através de pulsos mecânicos longitudinais. O princípio fundamental de funcionamento de um ecobatímetro consiste na transmissão vertical de um feixe de ondas sonoras ou ultra-sonoras por um emissor instalado na embarcação de sondagem, chamado transdutor⁸. Para que a transmissão de tais ondas ocorra verticalmente, o transdutor deve estar corretamente posicionado na vertical, o que quase sempre não é possível. Sendo assim, é necessário efetuar a correção de atitude do transdutor. As ondas sonoras emitidas pelo transdutor atravessam o meio líquido e atingem o fundo. A interação com o fundo resulta em reflexão, transmissão e espalhamento (*scattering*). Parte da energia refletida, o eco, retorna a superfície, onde é detectada pelo transdutor, o tempo decorrente da emissão e recepção da onda sonora é então medido pelo ecobatímetro. Conhecendo-se a velocidade de propagação do som na água é possível calcular uma medida aproximada da profundidade local, denominada sondagem, através da Equação (1) (IHO, 2005; MATIAS, 2010).

$$S = 0,5 \cdot v \cdot t \quad (1)$$

Onde:

S - medida aproximada da profundidade local (sondagem);

v - velocidade de propagação do som na água, e

t - tempo gasto pelo sinal para ir ao fundo e retornar.

⁷Procedimento essencial que consiste na determinação dos desvios em *roll*, *pitch* e *yaw* do transdutor e sensor inercial e da latência entre os sistemas (IHO, 2005).

⁸Por definição, o transdutor é um equipamento utilizado para transmitir e receber pulsos acústicos. Existem outros dispositivos semelhantes que são o projetor que apenas transmite a onda acústica e o hidrofone ou receptor que é passivo, sendo usado somente para a recepção da onda acústica (IHO, 2005).

Segundo Felix (1996) os ecobatímetros monofeixe são constituídos basicamente de:

- Gerador de pulso: dispositivo automático que provoca a emissão de vibrações;
- Gerador de alta tensão: gera uma voltagem elevada para excitação do transdutor;
- Transdutor: converte a energia elétrica em ondas sonoras, e vice e versa;
- Amplificador: amplifica as oscilações elétricas geradas no transdutor e transmite-as para o registrador; e
- Registrador: transforma o intervalo de tempo decorrido entre a emissão do pulso sonoro e a recepção do seu eco em registros de profundidades, em função da velocidade de propagação do som na água.

O gerador de pulso produz periodicamente um pulso de energia elétrica. Este é enviado ao registrador, ao mesmo tempo o transdutor converte o pulso recebido de energia elétrica em um pulso de energia sônica ou ultrassônica pelo princípio da magnetostricção⁹ ou da piezoelectricidade¹⁰ e o emite verticalmente para a coluna d'água. Parte da energia sonora quando encontra o fundo é refletida e retorna a superfície em forma de eco. O sinal recebido pelo transdutor é então transformado em energia elétrica e enviado ao amplificador, que amplifica e filtra o pulso elétrico. Feito isso o pulso elétrico é enviado ao registrador, que converte automaticamente o intervalo de tempo decorrido entre a emissão do pulso sonoro e a recepção de seu eco em registros de profundidade (MIGUENS, 2000).

As profundidades podem ser visualizadas e registradas em formato digital com escala adequada para ecobatímetros que possuam o dispositivo apropriado ou em um *notebook* acoplado ao ecobatímetro, sendo que neste caso é necessário um *software* específico. Existem ainda equipamentos que possuem um gravador gráfico de papel para registro das profundidades. Com as profundidades registradas (ecogramas), é possível, em uma posterior análise, efetuar correções manuais em casos de dúvidas nas sondagens (RIBEIRO, 2008).

O desempenho do ecobatímetro é afetado tanto pela topografia submarina quanto pela natureza do fundo. A propagação da onda sonora depende principalmente da profundidade e

⁹Consiste na propriedade que certos metais possuem de variarem seu comprimento com a variação do campo magnético que os envolvem. (MIGUENS, 2000).

¹⁰Consiste na propriedade de certos materiais cerâmicos de variarem suas dimensões quando é aplicada uma diferença de potencial entre seus extremos (MIGUENS, 2000).

dos sedimentos que cobrem o leito submerso, fundos de lama, por exemplo, absorvem uma parte considerável da onda sonora, enquanto que fundos de areias refletem muito bem o som (MIGUENS, 2000).

A Equação (2) é utilizada para estudar e expressar a capacidade de detecção do eco e o desempenho dos ecobatímetros em função das condições de operação:

$$EE = SL - 2TL - (NL - DI) + BS - DT \quad (2)$$

Onde:

EE - *Echo Excess*/excesso de eco;

SL-*source level*/nível do centro de transmissão, ou nível da fonte;

TL - *transmission loss*/perdas de transmissão;

NL - *noise level*/nível de ruído;

DI - *directivity index*/índice de directividade;

BS - *backscatter strength*/nível de retrodifusão, e

DT - *detection threshold*/limiar de detecção.

Mais detalhes a cerca deste assunto podem ser encontradas em IHO (2005).

Para a medição correta da profundidade os ecobatímetros monofeixe devem ser calibrados. A calibração consiste em seleccionar o valor preciso da velocidade de propagação do som na água. Em sistemas monofeixe a calibração pode ser realizada através do método *bar-check*. Também é possível corrigir as profundidades medidas em um pós-processamento através da aplicação do perfil de velocidade de propagação do som na coluna d'água. Este procedimento é utilizado para os sondadores de multifeixe. O método *bar-check* consiste em utilizar uma chapa metálica circular, de 30 a 40 cm de diâmetro, fixada a um cabo de aço graduado. Esta deve ser arriada abaixo do transdutor. Sabendo-se a profundidade já submersa da placa (observando-se a graduação no cabo de aço), verifica-se se a profundidade indicada pelo ecobatímetro está correta, altera-se a velocidade do som, se necessário, até que as profundidades verificadas no ecobatímetro e no cabo de aço sejam coincidentes. A calibração deve ser realizada, no mínimo, até 70% da profundidade máxima do local (IHO, 2005).

2.5. Velocidade de propagação do som na água

A técnica usada pelo ecobatímetro mede a profundidade indiretamente. Para conhecer a profundidade é necessário conhecer de antemão o perfil da velocidade de propagação do som na água. Os corpos d'água juntamente com seus limites, constituem um meio extremamente complexo para a propagação som. A velocidade de propagação do som na água deve ser determinada de forma acurada para evitar a introdução de erros sistemáticos na obtenção das profundidades (IHO, 2005)

Na água, a velocidade do som é cerca de quatro vezes a sua velocidade no ar, à 25° C é de aproximadamente 1500 m/s. A explicação para este fenômeno é que conforme aumenta a densidade do meio, aumenta a velocidade de propagação das ondas mecânicas. A densidade da água não é constante e sim dependente de três fatores, a saber: temperatura, pressão e salinidade. Esta última afeta as profundidades somente em ambiente marinho e geralmente é medido em partes por mil, por influenciar muito pouco (IHO, 2005; MATIAS, 2010).

A temperatura e a pressão são fatores que merecem uma atenção especial, por influenciarem de maneira considerável a variação de velocidade do som na água. Entre a superfície d'água e o limite inferior da termoclina¹¹, a temperatura é o fator dominante na variação de velocidade do som na água, porém, em maiores profundidades o fator dominante passa a ser a pressão. Nos primeiros 1000 m de profundidade a temperatura, de modo geral, decresce, mas a partir dessa profundidade torna-se quase constante. A medida de profundidade é muito sensível à variação de temperatura, 1°C, por exemplo, ocasiona uma variação de aproximadamente 4,5 m/s na velocidade de propagação do som. A pressão aumenta com a profundidade e a taxa de variação da velocidade de propagação do som é de 1,6 m/s para cada 10 atmosferas (IHO, 2005).

Para determinar a velocidade do som em um determinado corpo d'água, é necessário considerar estes elementos, o que requer o uso de um modelo matemático que comporte os mesmos. Em sondadores de feixe simples que possuem o feixe acústico próximo da vertical é suficiente a utilização de um valor médio de velocidade de propagação do som na água. Os sondadores multifeixe possuem feixes oblíquos, que são mais sensíveis aos efeitos da

¹¹Corresponde a um gradiente negativo da temperatura ao longo da coluna d'água e que é mais acentuado que nas camadas adjacentes, inferior e superior, também conhecido como camada térmica (MIGUENS, 2000).

refração. Desta forma é necessário conhecer o perfil de variação da velocidade do som ao longo da coluna d'água (IHO, 2005).

2.6. Princípios físicos e geométricos relacionados ao pulso sônico

Conhecido o método de geração do pulso sonoro e o princípio da velocidade de propagação do som no meio, é necessário conhecer os princípios físicos e geométricos que afetam a propagação das ondas sonoras e interessam diretamente ao desempenho dos ecobatímetros (IHO, 2005).

Os princípios físicos são a dispersão, absorção, reflexão, e refração. Estes fatores representam as alterações sofridas pelo pulso desde sua emissão até sua captação. A onda sonora é atenuada, ou seja, perde energia na propagação, pela dispersão e pela absorção (MIGUENS, 2000).

A dispersão pode ser explicada da seguinte forma: a energia disponível para a obtenção de um eco decresce com a distância, porque o pulso se dispersa à medida que se afasta da fonte. As ondas sonoras ao se propagarem nos corpos d'água sofrem perdas causadas pela absorção de potência pelas partículas do meio. Embora vários fatores contribuam para a absorção, o fator predominante é a frequência. A absorção sofre um aumento substancial com o aumento da frequência, razão pela qual as frequências elevadas¹² não são utilizadas em ecobatímetros de longo alcance (MIGUENS, 2000).

A reflexão das ondas acústicas é fator indispensável para o funcionamento dos ecobatímetros. Ela é responsável pela detecção do fundo, pois ocorre quando o pulso não consegue atravessar um obstáculo. As presenças de corpos estranhos no meio, como peixes ou troncos, podem causar reflexão, mas causam principalmente espalhamento. A parte da energia sonora espalhada que retorna à fonte é chamada de reverberação. As ondas sonoras podem sofrer várias reflexões entre a superfície e o fundo dependendo da profundidade, características do fundo e potências envolvidas (MIGUENS, 2000; IHO, 2005).

A refração é o processo pelo qual a direção de propagação da onda acústica varia, sendo que este mesmo processo pode ocorrer de duas formas. Quando a onda sonora passa de um meio para outro com velocidades de propagação do som diferentes; ou quando a velocidade

¹² Não há um limiar entre baixa e alta frequência, porém, tradicionalmente, ecobatímetros com frequências superiores a 80 kHz são ecobatímetros considerados de alta frequência.

de propagação do som varia ao longo de um único meio de propagação (MIGUENS, 2000; IHO, 2005).

Além dos princípios físicos que afetam a propagação das ondas sonoras, existe uma série de elementos que afetam a geometria da onda sonora. Dentre eles podemos citar a frequência, o comprimento de onda e a abertura do feixe cônico emitido pelo transdutor. A frequência determina o alcance do pulso, bem como a sua penetração nos sedimentos. Frequências menores são capazes de atingir maiores profundidades, porém são poucos discriminativas. O comprimento do pulso define a quantidade de energia transmitida, sendo que grandes comprimentos de ondas podem confundir dois alvos distintos. A abertura do feixe cônico emitido pelo transdutor merece uma atenção especial devido a inúmeros fatores, o principal deles é que o ângulo de abertura define a máxima inclinação que o barco pode ter em ambos os eixos sem a necessidade de efetuar as correções de atitude da embarcação de sondagem. (IHO, 2005).

2.7. Posicionamento relativo cinemático em tempo real (RTK)

Uma das maiores dificuldades em levantamentos batimétricos sempre foi o controle do posicionamento dinâmico da embarcação de sondagem, em razão da impossibilidade de se materializar pontos estáveis de observação (marcos) e tampouco efetuar medições repetidas, para um posterior ajustamento das profundidades (RAMOS, 2007).

Nos levantamentos batimétricos são utilizadas diversas técnicas, das quais podemos citar: sistemas diferenciais de posicionamento GPS (DGPS), sistemas de posicionamento por ponto preciso em tempo real (RTG, Omnistar, *etc.*), ou pós-processado (PPP cinemático), ou métodos de posicionamento cinemático pós-processado (PPK) ou em tempo real (RTK), ou ainda, poderá ser utilizado o posicionamento GPS absoluto em alguns casos.

O posicionamento por GPS diferencial (DGPS) é uma técnica que utiliza dois ou mais receptores, um dos quais se encontra num ponto de referência (Estação de Referência) e outro (receptor móvel) que ocupa os novos pontos a serem determinados num levantamento (estático ou cinemático). Quando o posicionamento diferencial é aplicado às medições da fase da portadora em tempo real, a técnica DGPS passa a se chamar RTK (*Real Time Kinematic*).

A técnica RTK (*Real Time Kinematic*), foi desenvolvida no início dos anos 90 e teve como objetivo melhorar a precisão do método diferencial baseado em observações do código ou código suavizado pela onda portadora (DGPS).

O princípio básico do funcionamento do sistema RTK consiste no posicionamento em tempo real de uma estação móvel através das correções diferenciais geradas na estação de referência, como ilustra na Figura 2. A transmissão dos dados para a estação móvel é realizada via *link* de rádio, através de um modem de telefone móvel (técnica NTRIP) ou através de algum outro sistema de comunicação (MONICO, 2007).

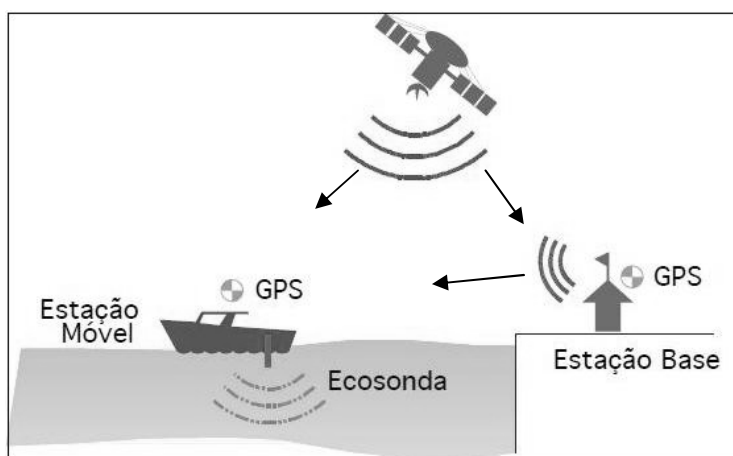


Figura 2. Esquema de funcionamento da batimetria em tempo real (Fonte: Dias, 2010).

Segundo Ribas (2008) os receptores de dupla frequência que possuem a tecnologia RTK trabalham com precisões na ordem de 0,5 a 2 cm na horizontal, e de 1 a 3 cm + 1ppm na vertical, além de permitir que as ambiguidades sejam determinadas em movimento e a reinicialização obtida de forma automática. Essa precisão pode variar em função da latência do sistema, do número de satélites observados, do número DOP (*Dilution of precision*) e com a distância entre a estação de referência e a estação móvel.

Segundo Monico (2007) a aplicação do método RTK se limita a curtas distâncias, até 10 Km, entre a estação móvel e a estação de referência, desta forma, podem-se considerar os efeitos da refração ionosférica e troposférica iguais em ambas as estações e eliminá-los. Nesta técnica são eliminados também os erros do relógio do satélite.

No Brasil empresas do ramo de hidrografia têm optado pelo uso de receptores GNSS com correção diferencial obtida via satélite, conhecida como “banda L”. “A banda L” é

provida pela OmniSTAR¹³ através de uma rede de 70 estações de referência espalhadas pelo mundo e 2 centros de controle. A OmniSTAR oferece serviços de correção que podem melhorar a acurácia do receptor GNSS em mais de 100 vezes. Atualmente, quatro níveis de serviço são oferecidos: o modo "VBS" que oferece posicionamento melhor que 1 m, o modo "XP" com precisão subdecimétrica, o modo "HP" também com precisão subdecimétrica, porém com melhor acurácia que o método "XP" e o modo "G2". Este último é a mais recente tecnologia disponibilizada pela OmniSTAR. Consiste na junção do GPS+GLONAS, o que proporciona um maior número de satélites e conseqüentemente uma maior precisão.

Apesar de menos precisa que o RTK, é mais que o suficiente para atender a precisão em levantamentos hidrográficos exigida pela Marinha do Brasil, o que pode ser constatado na NORMAM-25. O sistema OmniSTAR tem como grandes vantagens a fácil aplicação, uma vez que não exige implantação de estação base, correção diferencial com cobertura global e receptores de baixo custo. Como principal desvantagem está à exigência do pagamento de assinatura anual para recepção do sinal diferencial. O contrato anual do modo "VBS" ou "XP", por exemplo, custa, em média, R\$4.000,00. As correções diferenciais na América do Sul são transmitidas pelo satélite AM-Sat (INFORMAÇÃO VERBAL¹⁴).

2.8. Controle do nível da água

As profundidades obtidas em levantamentos batimétricos incluem as variações do nível das águas por influência das marés ou em decorrência dos períodos de cheias e vazantes dos rios. Dessa forma se faz necessário realizar um monitoramento das variações do nível d'água para posteriormente corrigir as profundidades dos efeitos de maré. Apesar do termo "nível d'água" ser mais correto tecnicamente, o termo "maré" é tradicionalmente aceito e amplamente utilizado, em águas doces ou salgadas, devido a sua ligação com os equipamentos e *softwares* utilizados para medir as variações da superfície da água (IHO, 2005).

Devido às variações do nível d'água, um levantamento batimétrico se torna algo datado no tempo, isto é, reproduz uma situação determinada. Desta forma é importante padronizar a

¹³Worldwide Differential Global Positioning Service - Omnistar USA, Inc. Sistema proprietário operado pela Fugro, Inc. (<http://www.omnistar.com>).

¹⁴Fornecida por Sandro J. P. Paixão, Eng. Agrimensor e de Seg. do Trabalho, diretor técnico da UMI SAN, empresa atuante na área de hidrografia e engenharia.

origem das profundidades. Nas cartas náuticas o referencial vertical é chamado de NR (nível de redução), todas as profundidades são reduzidas a este nível visando à eliminação das variações do nível d'água durante o levantamento. Tais reduções são realizadas após as correções de atitude da embarcação de sondagem. O NR é definido por um plano suficientemente abaixo do nível médio dos corpos d'águas, de modo que represente as profundidades mínimas a serem encontradas na região garantindo assim, segurança durante a navegação. Assim o NR é estabelecido em função das características locais da maré ou do regime de águas de um rio (IHO, 2005).

A DHN adota para as áreas marítimas um NR correspondente à média das baixa-mares de sizígia¹⁵ (MLWS) do local e no caso de rios o NR adotado correspondente a média das mínimas excepcionais. Os NRs são materializados no terreno por meio de RN (referências de nível) da DHN, para as áreas marítimas, ou da ANA (Agência Nacional de Águas), para as áreas fluviais (<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/mares.html>, acessado em janeiro de 2011).

Visando uma padronização mundial, foi adotado pela IHO o plano definido pela LAT (*Lowest Astronomical Tide*) como padrão internacional para o NR. É importante ressaltar que o NR apresenta variações espaciais e temporais em relação ao *datum* vertical terrestre (IHO, 2005).

O monitoramento do nível d'água em áreas de rios e lagos, onde não há variações bruscas no nível d'água, pode ser realizado em apenas dois momentos, no início e no fim do levantamento batimétrico. Esse registro pode ser feito a partir de medições de altura da lâmina d'água em réguas linimétricas instaladas nas proximidades da área sondada. As réguas devem ser niveladas em relação ao NR. Quando não se dispuser de RNs às margens do local levantado é necessário realizar um transporte de altitude. Um dos métodos mais utilizados, devido à alta precisão, é o nivelamento geométrico, método das visadas iguais. Neste tipo de nivelamento o nível é instalado equidistante dos extremos (ré e vante), a fim de se evitar erros de curvatura terrestre, refração atmosférica e erro de colimação do instrumento. A diferença de nível é obtida de forma direta com a subtração da leitura da ré com a leitura de vante (SANTOS, 2009; PAIXÃO, 2010a).

15 Marés de sizígia são as marés que ocorrem nas luas cheia e nova, quando os efeitos lunares e solares reforçam uns aos outros, produzindo as maiores marés altas e menores marés baixas.

Em ambientes marinhos que sofrem uma maior influência do efeito de marés esta deve ser monitorada, usualmente através das tábuas de marés, em curtos intervalos de tempo, geralmente a cada 10 min, durante todo o período de coleta de dados batimétricos. Tal fato se dá pela existência de significativas mudanças na altura da lâmina d'água entre os eventos de preá-mar e baixa-mar. Em cidades como São Luís-MA a maré chega a alcançar amplitude próxima de 7 m em alguns eventos de lunação de sizígia (PAIXÃO, 2010b).

Estudos sobre a aplicação da técnica RTK para controle da variação do nível d'água vêm sendo realizados. Segundo Ramos (2007) esta técnica permite elevada precisão na determinação da maré e minimiza alguns erros, inclusive os cotidais¹⁶. Além disso, dispensa apoio em terra para as observações da variação do nível d'água. No entanto, essa técnica necessita de um acurado modelo geoidal.

Em algumas regiões, principalmente em rios, deve-se considerar a existência de diferenças de nível em terra, e assim, devem-se monitorar, além das variações do nível d'água, as variações das cotas ao longo da margem, pois estas podem provocar erros de profundidade no levantamento batimétrico (IHO, 2005).

2.9. Análise da precisão em levantamentos batimétricos

Os erros na determinação da profundidade, assim como nas ciências geodésicas, podem ser divididos em três categorias: erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios. Os erros grosseiros são aqueles provocados por falhas ocasionais dos instrumentos e/ou do observador, facilmente detectáveis por causarem medições anômalas. Os erros sistemáticos são devido a deficiências na compensação dos erros fixos ou de desvios nas medições, e podem ser determinados e eliminados durante a calibração do sistema ou corrigidos em uma posterior análise estatística. Após a remoção dos erros grosseiros e sistemáticos, restam ainda os erros aleatórios, que podem ser analisados através de rigorosas técnicas estatísticas de forma a quantificar a precisão das observações (IHO, 2005).

No estudo referente aos levantamentos batimétricos devem ser feitas distinções entre as palavras “sondagem” e “profundidade”. Profundidade é o valor real da distância vertical entre um determinado nível da água (no caso das cartas náuticas este nível é o NR) e o fundo

¹⁶Erro devido à correção da diferença entre a maré na área do levantamento e aquela observada na tábua de marés na costa (IHO, 2005).

submerso. A sondagem é dada pela Equação (1) (ver página 12) e corresponde a uma medida aproximada da profundidade local. Portanto, devem ser acrescentadas à sondagem várias correções (instrumentais, de posição do transdutor, da atitude da embarcação de sondagem e ambientais) para que seja possível a obtenção da profundidade reduzida¹⁷ com uma incerteza menor. A profundidade reduzida é dada pela Equação (3) (RAMOS, 2007):

$$P = 0,5 \cdot v \cdot t + k + D + \varepsilon \quad (3)$$

Onde:

P - profundidade reduzida - referida a um nível de redução - (em metros);

v - velocidade de propagação do som na água inserida no ecobatímetro (em m/s);

t - tempo gasto pelo sinal para ir ao fundo e retornar (em segundos);

k - índice de correção instrumental para o ecobatímetro (em metros);

D - *Draft* - Profundidade de imersão do transdutor - (em metros), e

ε - outras correções, tais como: variações dinâmicas de calado, devido ao consumo de água e de combustível, movimento de *Settlement*¹⁸ e *squat*¹⁹ da embarcação de sondagem, estabelecimento do NR e variação do nível d'água, em metros.

Os levantamentos batimétricos devem seguir as normas estabelecidas pela DHN em consonância com a IHO. Na medição da profundidade a Incerteza Vertical Total Máxima permitida (IVT_{Max}) para um nível de confiança de 95%, é dada pela Equação (4):

$$IVT_{Max} = \pm \sqrt{a^2 + (b * P_{média})^2} \quad (4)$$

Onde a representa a porção da incerteza que não varia com a profundidade, b é o coeficiente que representa a porção da incerteza que varia com a profundidade e $P_{média}$ é a profundidade média. As constantes a e b são dadas pela Tabela 1 e variam de acordo com a classificação dos levantamentos hidrográficos (IHO, 2008).

¹⁷Profundidade corrigida dos efeitos de maré (IHO, 2005).

¹⁸Corresponde a um decréscimo do nível da linha d'água de uma embarcação em movimento, comparativamente ao mesmo nível, considerando-se a embarcação parada (IHO, 2005).

¹⁹Diferença de nível observada entre a proa e a popa de uma embarcação, quando em movimento, gerando um sistema de ondas da proa para popa da embarcação (IHO, 2005).

Tabela 1. Constantes para o cálculo do IVT_{Max} .

Classificação	Especial	1a	1b	2
Precisão das Profundidades Reduzidas (nível de confiança de 95%)	$a = 0,25$ m $b = 0,0075$	$a = 0,50$ m $b = 0,013$	$a = 0,50$ m $b = 0,013$	$a = 1,00$ m $b = 0,023$

(Fonte: IHO, 2008)

O levantamento estará de acordo com os padrões de qualidade quando a Incerteza Vertical Total estimada (IVT_{Est}) das profundidades reduzidas for inferior ao IVT_{Max} . O IVT_{Est} das profundidades reduzidas pode ser obtido através de um balanço dos erros, não correlacionados entre si, do sistema de sondagem. A correta avaliação do IVT_{Est} permite verificar se determinado sistema é capaz de alcançar os requisitos mínimos de qualidade para determinado tipo de levantamento (IHO, 2005; RAMOS, 2007).

O IVT_{Est} , ao nível de confiança de 68 % (ou 1σ), é obtido pela raiz quadrada do somatório das variâncias de todas as parcelas integrantes da Equação (3), dado pela Equação (5) (IHO, 2005):

$$IVT_{Est} = \sqrt{\sigma_{zv}^2 + \sigma_{zt}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_i^2 + \sigma_R^2 + \sigma_{Tide}^2} \quad (5)$$

Onde:

σ_{zv}^2 - variância da profundidade devida à incerteza na medida da velocidade do som e à sua variação temporal e espacial;

σ_{zt}^2 - variância da profundidade devida à incerteza na medida do tempo de propagação do feixe acústico;

σ_h^2 - variância da profundidade devido ao efeito heave;

σ_i^2 - variância da profundidade em função da incerteza na posição do transdutor, alterações de calado, efeitos de assentamento e *squat*;

σ_R^2 - variância da profundidade devido à incerteza na leitura dos registros do ecobatímetro e em função da sua resolução, e

σ_{Tide}^2 - variância da profundidade em função às incertezas na observação e redução das variações do nível d'água.

Assumindo que as componentes das incertezas seguem uma distribuição aproximadamente normal, o IVT_{Est} , a um nível de confiança de 95 % é obtido substituindo na Equação (5) cada variância σ^2 por $(1,96\sigma)^2$ (IHO, 2005).

O IVT_{Est} calculado pela Equação (5) estabelece uma estimativa da qualidade do levantamento baseada nos possíveis desvios não correlacionados do sistema de sondagem. Porém é preferível que a precisão do levantamento batimétrico seja baseada em medidas redundantes coletadas pela mesma embarcação de sondagem. Entretanto a coleta de dados redundantes em ambientes submersos não é tão simples como em levantamentos geodésicos, topográficos ou fotogramétricos, onde é possível efetuar inúmeras medições repetidas para um posterior ajustamento e ainda fixar marcos de controle (RAMOS, 2007).

Diante da dificuldade de obtenção de medidas repetidas em fundos submersos, em levantamentos batimétricos realizam-se linhas de verificação que cruzam as linhas regulares de sondagem ortogonalmente, a fim de se gerar um segundo conjunto de observações a partir da mesma embarcação de sondagem. Nas intersecções entre os perfis longitudinais e transversais estabelecem-se um raio de busca onde a diferença entre as profundidades reduzidas das linhas regulares de sondagem e de verificação deveriam ser nulas. Através destas diferenças são gerados índices estatísticos baseados no desvio padrão das diferenças entre as profundidades (σ_{erro}), parcela dependente da profundidade, e na média das diferenças entre as profundidades ($\sigma_{média}$), parcela que não depende das profundidades. Com estes índices também é possível calcular a estimativa do IVT_{LV}^{20} , ao nível de confiança de 95% (ou $1,96\sigma$), através da Equação (6) sugerida por Ramos (2007):

$$IVT_{LV} = 1,96\sqrt{\sigma_{erro}^2 + \sigma_{média}^2} \quad (6)$$

É necessária uma quantidade adequada de intersecções para a correta análise da precisão do levantamento (RAMOS, 2007). A DHN recomenda que a análise das linhas de verificação seja realizada a fim de se detectar erros grosseiros e sistemáticos que possam ter advindo dos sistemas de posicionamento, sondagem ou processo de redução do nível d'água (BRASIL, 2011).

²⁰Neste texto o IVT_{Est} calculado através das linhas de verificação será representado pela sigla IVT_{LV} a fim de evitar confusões ao leitor.

2.10. Métodos de interpolação

O produto resultante de um levantamento batimétrico monofeixe é uma malha de pontos tridimensionais que, por si só, não é capaz de gerar diretamente a superfície do fundo levantado. Para construir o MDP que representa tal morfologia, é necessário empregar técnicas de interpolação para estimar o valor da profundidade em locais não amostrados (CAMARGO, 1998).

Os interpoladores são funções matemáticas usadas na construção de superfícies contínuas a partir de um conjunto de pontos coletados. Eles são utilizados para densificação de uma amostra que não cobre todo o domínio de interesse. As técnicas de interpolação baseiam-se, mais frequentemente, na primeira lei da Geografia que diz que coisas próximas tendem a ser mais correlacionadas do que coisas que estão distantes (MESQUITA, 2009).

Diversos são os métodos de interpolação encontrados na literatura, cada um com suas particularidades e características. Estes são divididos basicamente em interpoladores determinísticos e probabilísticos (SANTOS, 2011). Ambos os métodos baseiam-se na semelhança de pontos próximos para criar uma superfície espacialmente contínua. Os modelos determinísticos fazem previsões a partir de funções matemáticas. Já os modelos probabilísticos, além das funções matemáticas, recorrem também a métodos estatísticos, podendo assim, além de criar superfícies espacialmente contínuas, estimar a incerteza das previsões (MESQUITA, 2009).

Dentre os interpoladores determinísticos podem-se citar: a triangulação, o inverso da distância (ponderada ou não) e o vizinho mais próximo. Estes métodos, apesar de fácil aplicação, possuem limitações na representação da variabilidade espacial, porque são baseados em métodos onde se supõe independência espacial entre as amostras ou distribuição espacial aleatória (VIEIRA, 2000) e se desconsidera a anisotropia e a continuidade do fenômeno observado (CAMARGO, 1998). Dessa forma a variabilidade espacial da maioria dos fenômenos naturais não pode ser mapeada por simples funções matemáticas. Neste sentido, tem-se aplicado largamente a Geoestatística (krigagem).

2.10.1. Geoestatística

A Geoestatística é fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas. Tal teoria pressupõe que o fenômeno estudado seja estacionário (VIEIRA, 2000). A inferência

geoestatística baseia-se na pressuposição de três hipóteses de estacionariedade: a estacionariedade de primeira e segunda ordem e do semivariograma. Para estudos de Geoestatística exige-se a estacionariedade de segunda ordem (GUIMARÃES, 2004). Porém, segundo Santos (2011), tal hipótese pode não ser satisfeita para alguns fenômenos, nestes casos, uma hipótese menos restritiva pode ser usada, a hipótese intrínseca ou estacionariedade do semivariograma.

A hipótese intrínseca diz que a esperança de $Z(l)$ existe e não depende da localização l , e que para todo Δd , a variância da diferença $[Z(l+\Delta d) - Z(l)]$ existe e não depende da localização l , onde $Z(l)$ corresponde a uma ocorrência do fenômeno estudado no ponto l e Δd é a distância entre as sucessivas ocorrências (GUIMARÃES, 2004; SANTOS, 2011).

O semivariograma é a ferramenta mais difundida na Geoestatística justamente porque exige que apenas a hipótese intrínseca seja satisfeita (GUIMARÃES, 2004). O semivariograma experimental é obtido a partir do cálculo das semivariâncias $\gamma(\Delta d)$ dada pela Equação (7):

$$\gamma(\Delta d) = \frac{1}{2N(\Delta d)} \sum_{i=1}^N [Z(l_i) - Z(l_i + \Delta d)]^2 \quad (7)$$

Onde $N(\Delta d)$ é o número de pares dos valores $Z(l_i)$ e $Z(l_i + \Delta d)$, separados por uma distância Δd . Espera-se que as diferenças $\{Z(l_i) - Z(l_i + \Delta d)\}$ decresçam à medida que Δd decresça, ou seja, é esperado que as observações mais próximas espacialmente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas mais distantes. Sendo assim, espera-se que $\gamma(\Delta d)$ aumente com a distância (CAMARGO, 1998).

Como pode ser analisado na Equação (7), na construção do semivariograma, todos os possíveis pares de dados são examinados. Caso a distância Δd entre dois pontos seja nula, a semivariância também será. Quando a distância Δd é pequena, os pontos a serem comparados são muito semelhantes e, desta forma, são bastante correlacionados, logo o valor da semivariância é reduzido (MESQUITA, 2009). A representação gráfica do semivariograma é mostrada na Figura 3, onde são identificados os seguintes parâmetros:

- Alcance: distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;

- Patamar: é o valor do semivariograma correspondente ao seu alcance. A partir deste ponto, considera-se que não mais existe dependência espacial entre as amostras; e,
- Efeito Pepita: idealmente, $\gamma(0) = 0$. Porém, para a maioria dos fenômenos estudados existe uma descontinuidade do semivariograma para distâncias menores que a menor distância entre as amostras, então, $\gamma(0) \neq 0$. De acordo com CAMARGO (1998) parte desta descontinuidade pode ser atribuída à incertezas de medição, mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dessas incertezas ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.

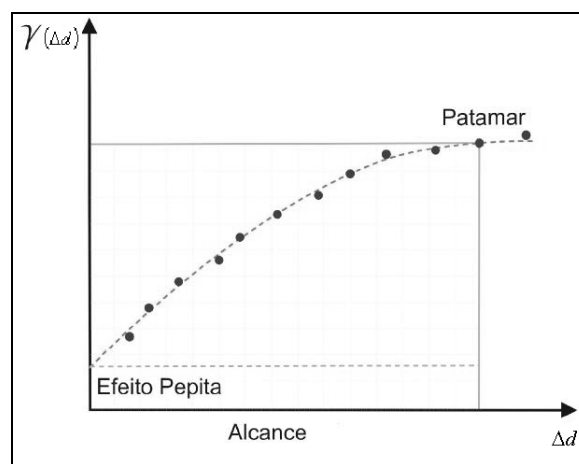


Figura 3. Semivariograma. (Fonte: Adaptado de Silveira , 2010).

Quando o semivariograma apresenta um comportamento idêntico para todas as direções ele é dito isotrópico, caso contrário, ele é dito anisotrópico. Caso seja detectada a anisotropia, esta deve ser corrigida, através de transformações lineares, pois a mesma impossibilita a existência da estacionariedade, condição necessária para a precisão na análise e estimativas dos dados da área em estudo (VIEIRA, 2000).

Após a obtenção do semivariograma experimental, pode-se então ajustá-lo através de modelos teóricos (SANTOS, 2011). É importante que o modelo ajustado represente a tendência de $\gamma(\Delta d)$ em relação à Δd . Desta forma, as estimativas obtidas a partir da krigagem serão mais acuradas e, portanto, mais confiáveis (CAMARGO, 1998). O ajuste do semivariograma teórico é uma fase muito importante, e sendo assim, não deve ser realizado automaticamente, pois todos os parâmetros necessários para efetuar a krigagem dependem do modelo de semivariograma ajustado e, deste modo, se o modelo for ajustado de forma inapropriada, a krigagem não apresentará a acurácia esperada (VILELA, 2004).

Na literatura especializada é possível encontrar diversos modelos isotrópicos que contemplam semivariogramas com e sem patamar. Dentre os modelos sem patamar, cita-se o modelo potência e dentre os com patamar (mais comuns), destacam-se o modelo exponencial, o modelo esférico e o modelo gaussiano (VIEIRA, 2000; SANTOS, 2011).

Os modelos com patamar são conhecidos na Geoestatística como modelos transitivos, alguns destes modelos atingem o patamar de forma assintótica. Para tais modelos, o alcance é arbitrariamente definido como a distância correspondente a 95% do patamar. Os modelos sem patamar, como o próprio nome sugere, não atingem o patamar, ou seja, eles continuam aumentando conforme a distância aumenta. Estes modelos são usados para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão (CAMARGO, 1998; VIEIRA, 2000).

A principal diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação está na maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. Na krigagem, os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, geralmente, estimativas sem viés e com variância mínima. Outra característica interessante da krigagem é que através dela é possível conhecer a variância da estimativa, ou seja, a krigagem fornece a precisão associada a cada predição (CAMARGO, 1998; VIEIRA, 2000).

Na literatura é possível encontrar diversos tipos de krigagem: krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal, krigagem disjuntiva, krigagem indicativa, cokrigagem, entre outras (CAMARGO, 1998; SANTOS, 2011). De acordo com LANDIM *et al.* (2002) os tipos mais utilizados são a krigagem simples e a krigagem ordinária. A krigagem simples é utilizada quando a média é assumida como estatisticamente constante para toda a área e a krigagem ordinária, por sua vez, considera-se a média flutuante ou móvel por toda a área.

Segundo Santos (2011) caso seja detectada tendência nos dados, deve-se utilizar a krigagem universal. Nesta, a remoção de tendência é feita através de um ajuste de polinômios de baixo grau, então, o restante do procedimento analítico torna-se uma análise dos resíduos. A krigagem universal foi proposta por Journel e Matheron para resolver um problema apresentado pelo Centro Cartográfico da Marinha Francesa, relacionado com o mapeamento de uma superfície submarina de pronunciada inclinação (LANDIM *et al.*, 2002).

2.10.2. Inverso ponderado da distância

O inverso ponderado da distância determina os valores para os locais não amostrados utilizando uma combinação linear ponderada de um conjunto de pontos da amostra. O peso é uma função do inverso da distância elevada a uma potência matemática qualquer (LANDIM, 2000; WATSON, 1985). Como resultado, à medida que a distância aumenta os pesos decrescem, sendo o decréscimo tanto mais acentuado, quanto maior for a potência escolhida. O valor do expoente pode ser escolhido minimizando-se o RMS das discrepâncias obtidas da validação cruzada (MESQUITA, 2009). O inverso ponderado da distância é dado pela Equação 8 descrita em Mesquita (2009):

$$Z(l_0) = \frac{\sum_{i=1}^n p(d_i) \cdot Z(l_i)}{\sum_{i=1}^n p(d_i)} \quad (8)$$

onde $Z(l_0)$ é o valor estimado para o local l_0 , n é o número de valores medidos, $Z(l_i)$, envolvidos na estimativa, $p(d_i) = \frac{1}{d_i^{Pot}}$ é a ponderação atribuída à observação i (função inverso da distância), e Pot é o expoente da potência matemática.

Souza (2002) afirma que o algoritmo do inverso ponderado da distância é o que melhor representa a superfície do terreno para a geração do modelo digital de elevação (MDE), uma vez que ele possui a característica de suavizar a superfície em estudo.

Outra característica importante deste método é que o modelo permite a manipulação dos parâmetros de dimensões do raio de busca, o número de vizinhos a serem processados no cálculo e a potência a ser empregada na ponderação da distância.

Segundo Landim (2000), com este método, os resultados são variáveis, desde altamente tendenciosos a favor dos pontos mais próximos a resultados onde o peso é praticamente o mesmo para todos os pontos próximos. Segundo este mesmo autor o expoente tem os seguintes efeitos sobre os resultados estimados: os expoentes baixos (0-2) destacam as anomalias locais, enquanto que expoentes altos (3-5) suavizam as anomalias locais.

A potencia zero causa uma superfície aparentemente plana, já que qualquer número elevado a zero é igual a 1, logo a superfície gerada será a média de todos os vizinhos utilizados na interpolação. Quando se aumenta muito a potência a superfície gerada aparenta

ser plana em regiões onde não há pontos amostrais e em regiões onde há pontos amostrais a superfície se ajusta perfeitamente a estes, logo gera-se picos e depressões ao longo dos pontos amostrados.

3. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

Os dados que serviram de base para este estudo foram coletados em dezembro de 2010 no levantamento batimétrico de um dos principais represamentos do Ribeirão São Bartolomeu, usado como ponto de captação de água do SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto), localizado no campus da UFV (Universidade Federal de Viçosa), no município de Viçosa, em Minas Gerais. A área em estudo possui aproximadamente 8800 m², 150 m de comprimento e 66 m de largura (Figura 4).



Figura 4 – Área de estudo / Vista parcial do Campus da UFV.

3.2. Materiais

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados, principalmente, os seguintes materiais:

- Um ecobatímetro *Hydrobox* da *Syqwest Inc.*, usado para a obtenção das profundidades, com precisão de 2,5 cm para profundidades de até 40m. Este equipamento opera nas frequências 33/210 kHz e coleta profundidades acima de 1 m.
- *Software Hydrobox Acquisition* da *Syqwest Inc.*, usado para configuração do ecobatímetro *Hydrobox*, visualização digital das profundidades (ecogramas) e comunicação com o programa de hidrografia *Hypack*;

- Um par de receptores RTK de dupla frequência GTR – G2 da *Techgeo*. Um receptor foi usado como estação móvel e o outro como estação de referência (base), com precisão horizontal no modo cinemático de 10 mm + 1 ppm e no modo estático de 5 mm + 0,5 ppm;
- *Software NovAtel CDU* , usado para a configuração dos receptores GTR – G2 da *techgeo*;
- Um par de rádios *Pacific crest* e antenas, usados para envio das correções RTK da estação de referência para a estação móvel. Este equipamento opera com uma potência de 35 W (estação de referência) e 2 W (estação móvel), na faixa de UHF e FM;
- Um receptor GPS de uma frequência (L1) *Promark II* da *Ashtech*, usado para o rastreamento dos pontos de apoio, com precisão horizontal no modo estático de 5 mm + 1 ppm;
- *Software Ashtech Solutions* usado para o processamento dos pontos obtidos com o receptor GPS *Promark II*;
- Um nível topográfico NI-002 da *Zeiss*, usado para a implantação da referência de nível, com precisão de 0,2mm/Km;
- Uma estação total GTS 212 da *Topcon*, usada para o levantamento topográfico dos arredores da área em estudo, com precisão linear de 3 mm + 5ppm e angular de 5 s;
- *Software Hypack da Coastal Oceanographics*, usado na criação das linhas de sondagem, coleta dos dados batimétricos, auxílio na navegação em tempo real, edição e processamento dos dados batimétricos;
- *Software ArcGIS 10*, usado nos estudos referentes a representação computacional das superfícies batimétricas.
- Uma embarcação de sondagem, suprimentos em geral e *etc.*

3.3. Métodos

3.3.1. Levantamentos de apoio

Devido à inexistência de pontos com coordenadas geodésicas conhecidas e de uma referência de nível nas proximidades da área de estudo, fez-se necessário a implantação de três marcos, denominados M0, M1 e M2, para apoiar os levantamentos topográficos e batimétricos. Os três marcos constituíram a poligonal usada no levantamento topográfico, sendo que os marcos M0 e M1 serviram para a amarração geodésica da mesma. O marco M0 foi usado ainda como referência de nível e como base para o posicionamento planimétrico dos dados batimétricos através da técnica RTK.

As coordenadas geodésicas precisas dos marcos M0 e M1 foram obtidas através de um posicionamento relativo estático, utilizando-se um receptor GPS *Promark II*. Os dados foram processados e ajustados no *software Ashtech Solutions*, ao nível de confiança de 95%, empregando como estação base a VICO²¹. Por se tratar de linhas de base curtas, com aproximadamente 500 m, optou-se por ocupar o ponto durante cerca de 40 min.

A altitude ortométrica do marco M0 foi obtida por meio de um nivelamento geométrico, método das visadas iguais, a partir da estação altimétrica - RN 3307F do IBGE localizada no pátio do Laboratório de Engenharia e Agrimensura da UFV. Foi usada uma RN do IBGE devido à inexistência de RNs da DHN ou ANA na região sondada somado ao fato de a área não ser usada para navegação.

Foi utilizado o nível topográfico NI-002, classificado pela NBR 13133 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) como sendo de precisão muito alta. O nivelamento foi calculado em uma planilha eletrônica.

Com a estação total *Topcon GTS 212*, classificado pela ABNT 13133 como sendo de precisão média, foi realizado o levantamento topográfico planimétrico dos arredores e limites da área de estudo para auxiliar o planejamento do levantamento batimétrico. Foi materializada uma poligonal Tipo I, conforme NBR 13.133, constituída de três vértices (M0, M1 e M2). O processamento dos dados topográficos foi realizado nos *softwares* *Topograph* e *AutoCAD*.

²¹Estação da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) presente no campus da UFV.

3.3.2. Planejamento do levantamento batimétrico

A DHN estabelece que o erro gráfico máximo permitido na carta náutica é de 0,2 mm e que a escala de execução do levantamento nunca deve ser inferior à escala em que será confeccionada a carta náutica. Para este trabalho estabeleceu-se uma escala de levantamento de 1/500, visando um erro máximo de 10 cm. Com base nesta escala foi planejado todo o levantamento batimétrico.

Com o *software Hypack* e a planta topográfica foram planejadas as linhas de sondagem regulares e de verificação. O afastamento entre as linhas regulares de sondagem, segundo as normas da IHO, varia de acordo com a ordem do levantamento e são especificados na Publicação Especial nº 44 da IHO (IHO, 2008). O Anexo A mostra estas informações, dentre outras. Porém como pode ser constatado, analisando a S-44, as ordens: “Especial” e “1^a” não se aplicam aos levantamentos monofeixe, visto que requerem a busca total do fundo. Sendo assim, o estudo realizado poderia se classificar nas ordens “1b” ou “2”. Porém, o espaçamento máximo recomendado para estas ordens não se aplicou a esta área de estudo. Por exemplo, se fosse utilizado a ordem “1b”, mais rigorosa que a ordem “2”, o afastamento entre as linhas regulares de sondagem seria em torno de 12 m, um espaçamento impraticável à esta área de estudo devido as suas dimensões.

Decidiu-se, então, visando a coleta de um maior número de dados, reduzir este espaçamento. Seguiram-se as recomendações de Martini (2007) (ver seção 2.1). Desta forma, as linhas regulares de sondagem foram projetadas de forma aproximadamente perpendiculares a margem. O afastamento entre as mesmas deve ser no máximo igual a 10 mm na escala do levantamento o que resultou, para a escala definida, em 5 m. No entanto, a fim de se evitar a ocorrência de feriados, adotou-se um afastamento entre as linhas de sondagem regulares igual a 4,5 m, tendo em vista que a tolerância adotada para feriados é de 1 mm, equivalente a 0,5 m na escala definida para o levantamento.

As linhas de verificação foram planejadas cruzando as linhas regulares de sondagem ortogonalmente. O afastamento entre as mesmas, conforme as normas da DHN, deve ser no máximo igual a 15 vezes o intervalo adotado para as linhas regulares de sondagem na escala do levantamento, o que resultou, para a escala definida, em 75 m. No entanto, devido as dimensões da área e visando uma maior redundância de dados para uma melhor análise do levantamento, optou-se por adotar um afastamento de 10 m.

3.3.3. Execução do levantamento batimétrico

O levantamento batimétrico foi realizado a partir de uma estação móvel composta por uma embarcação de sondagem, um ecobatímetro *Hydrobox*, um receptor RTK, um rádio *Pacific crest* com 2W de potência, uma antena para a recepção do sinal RTK, um *notebook* com o *software Hypack* e o *software Hydrobox Acquisition* em execução, uma chapa metálica para calibração do ecobatímetro e baterias para alimentar os equipamentos.

As sondagens foram determinadas pelo ecobatímetro *Hydrobox* que opera com frequência 33/210 kHz e com feixes acústicos de abertura próximos à vertical, e com cerca de 20 graus de abertura para a frequência de 33 kHz e 8 graus pra a frequência de 210 kHz.

Para a obtenção das profundidades com o ecobatímetro é necessário somar o valor das sondagens à altura de imersão do transdutor do ecobatímetro, conhecido como “*draft*”. O valor do *draft* está associado à montagem da estação móvel e o peso em seu interior. Sendo assim, o *draft* foi medido quando todos os equipamentos e componentes da equipe (timoneiro, operador e auxiliar) estavam a bordo da embarcação de sondagem e em seus devidos lugares, resultando em 0,39 m. O valor do *draft* foi inserido no *Software Hydrobox Acquisition*.

O posicionamento planimétrico das profundidades coletadas foi realizado através de sistema RTK, a partir da correção de sinal enviada continuamente em tempo real via sinal de rádio por uma estação de referência (marco M0). A estação de referência foi composta de um receptor RTK, um rádio *Pacific crest* com 35 W de potência, uma antena para a transmissão das correções diferenciais e baterias para alimentar os equipamentos.

Na estação móvel a antena do sistema RTK foi instalada verticalmente à lâmina d’água e de forma centrada em relação ao transdutor, ambos fixados através de uma barra metálica na borda da embarcação de sondagem. Esse sincronismo permitiu a redução do modelo matemático de correção dos erros no posicionamento da antena GPS em relação ao transdutor, ou seja, com essa configuração foi possível eliminar os *offsets* e os efeitos da rotação em torno do eixo Z (*heading*). Devido às condições do ecobatímetro (abertura do feixe cônico) e da área de estudo (um represamento sem correnteza ou ondas) não foi necessário equipamento para as correções do *pitch*, *roll* e *heave*.

O sistema de posicionamento RTK foi interligado com o ecobatímetro *Hydrobox* através do *software Hypack*, registrando simultaneamente, em tempo real, o posicionamento e

a profundidade a uma taxa de 10ms (milissegundos). O *Hypack* também gera continuamente navegação em tempo real, com base na posição calculada pelo sistema RTK, possibilitando, desta forma, a interação do operador e do timoneiro para manter a embarcação de sondagem navegando ao longo das linhas planejadas, podendo-se, inclusive, visualizar o afastamento da embarcação em relação à linha planejada, evitando-se os feriados. Seguindo recomendações de Guimarães (2009) navegou-se nas linhas regulares de sondagem e de verificação sempre a uma velocidade menor que 5 nós²² (em média 2 nós), evitando-se desta forma a inclinação do conjunto GPS/Transdutor.

O ecobatímetro foi calibrado no início e no fim da sondagem, com uma chapa metálica (*Bar-check*) com diâmetro de 40 cm, fixada a um cabo de aço de 5 m, graduado de 0,5 em 0,5 m. Com a calibração obteve-se a velocidade média de 1481m/s. O valor da velocidade foi inserido no *Software Hydrobox Acquisition*.

A variação do nível d'água foi monitorada por meio de uma régua linimétrica instalada próximo as margens da área sondada. O nivelamento da régua foi realizado através do marco M0. Como nesta lagoa não há variações bruscas do nível da lâmina d'água foram feitas apenas duas leituras, uma no início e outra no final do levantamento.

3.3.4. Processamento e análise dos dados batimétricos

O tratamento dos dados batimétricos iniciou-se com um processamento *no software Hypack*. A primeira etapa consistiu-se em verificar a ocorrência de clarões na área sondada (feriados). Esse processo é realizado analisando os arquivos brutos (*.raw*) de forma manual. Foram constados alguns clarões, fato esse justificado pela inexperiência do timoneiro em conduzir a embarcação de sondagem. Nestes referidos locais foi efetuada uma nova sondagem.

A próxima etapa consistiu na correção da atitude da plataforma de sondagem (*roll, pitch e yaw*) e do efeito *heave*, conforme citados na seção 2.2. Entretanto devido às condições do ecobatímetro, da profundidade e da meteorologia local as correções de *pitch* e *roll* puderam ser ignoradas, o *yaw* foi desconsiderado devido à forma de montagem do conjunto GPS/transdutor, e o efeito *heave* assim como as demais fontes de erros discutidas na

²² 1 nó corresponde a 0,5144 m/s.

fundamentação teórica não foram considerados neste trabalho devido às condições da área de estudo.

Posteriormente procedeu-se com a redução das profundidades ao NR local, que pode ser realizada pelo módulo *tide* (maré) do *Hypack*, porém durante o levantamento não houve variações consideráveis do nível d'água. Também foram monitoradas, através de um levantamento topográfico planialtimétrico, possíveis variações das cotas ao longo da margem, o que poderia ocasionar erros no cálculo das profundidades, porém, não foram constatadas diferenças significativas. Desta forma, adotou-se como NR o nível da superfície d'água do dia do levantamento.

Continuou-se o processamento dos dados com a edição das linhas sondadas no módulo *editing* do *Hypack*. Esse processo corresponde à visualização do ecograma digital para retirada de profundidades espúrias (*spikes*) e erros de posicionamento (*tops*). Neste processo também foi possível visualizar e editar a derrota percorrida pela embarcação de sondagem. A Figura 5 apresenta como exemplo, uma linha planejada e sua correspondente executada. Observa-se o afastamento da linha executada com relação à linha planejada e o perfil levantado do fundo submerso.

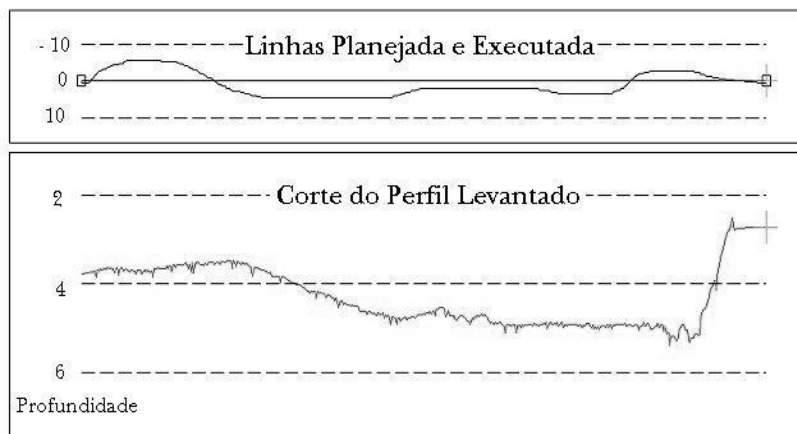


Figura 5 - Linha planejada e executada e o perfil do fundo da lagoa.

Após a edição das linhas sondadas analisou-se a precisão do levantamento a partir dos cruzamentos entre as linhas regulares de sondagem e de verificação. A análise foi realizada no módulo *Cross Statistics* do *Hypack*. Neste módulo é possível gerar os índices estatísticos que proporcionam uma estimativa do IVT_{LV} a partir Equação (6).

O IVT_{LV} foi confrontado com o IVT_{Max} calculado através da Equação (4), utilizando a profundidade média e todas as ordens presentes na Tabela 1, apesar das ordens “especial” e “1a” requererem a busca total do fundo. Seguindo as normas da DHN todas as linhas que apresentaram algum problema foram cuidadosamente analisadas e corrigidas ou excluídas, eliminando-se desta forma as possíveis fontes de erros grosseiros e sistemáticos.

O resultado do processamento foi um arquivo contendo 1414 pontos tridimensionais (arquivo “XYZ”). Com o mesmo foi possível dar continuidade aos estudos referentes à representação gráfica de superfícies batimétricas utilizando interpoladores determinísticos e probabilísticos.

3.3.5. Geração do modelo digital de profundidade

O ecobatímetro utilizado neste estudo opera em duas frequências, uma alta (*high*) de 210 kHz e outra baixa (*low*) de 33 kHz. Desta forma, através do processamento dos dados geraram-se dois arquivos “XYZ”, um para cada frequência. A frequência baixa é mais sensível aos efeitos da refração, devido à largura do seu feixe acústico, 20°, além de ser pouco discriminativa. Entretanto, esta frequência atinge maiores profundidades, o que permite a penetração do feixe acústico na lama depositada no fundo submerso. Sendo assim, a frequência de 33 kHz foi utilizada para obter uma estimativa do volume de lama fluídica depositada no fundo do represamento. Em corpos d’água navegáveis a presença de lama fluídica pode impedir a navegação de certas embarcações por restrições de calado. Para os demais estudos foi utilizado o arquivo “XYZ” gerado a partir da frequência alta.

Conforme já citado, o estudo relacionado à representação gráfica de superfícies batimétricas foi separado em dois tópicos. No primeiro buscou-se quantificar os erros cometidos ao se aplicar a krigagem pelo auto-ajuste (denominado *default*), em especial a krigagem ordinária, ignorando os procedimentos que antecedem uma interpolação, tais como, análise exploratória dos dados, análise variográfica e modelagem do semivariograma, em processos de levantamentos batimétricos. No segundo tópico objetivou-se analisar, comparativamente, a eficiência da krigagem e do inverso ponderado da distância na representação computacional de superfícies batimétricas, variando de forma decrescente a quantidade de pontos amostrais.

3.3.5.1. Estudo sobre a utilização adequada da krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas

Primeiramente realizou-se a krigagem ordinária de forma automática (krigagem *default*) e posteriormente a validação cruzada. A validação cruzada é o procedimento que quantifica a incerteza inerente a qualquer processo de estimação. Esta consiste na estimativa de cada ponto observado supondo que ele não existe no processo de predição, levando em conta a variabilidade espacial local expressa nas primeiras distâncias do semivariograma. Ao final gera-se um arquivo com os n valores observados e seus correspondentes preditos; através deste arquivo é possível obter várias estatísticas. É através destas que se avalia a qualidade da estimativa (VIEIRA, 2000; SANTOS, 2011).

De acordo com Vieira (2000) através da validação cruzada pode-se obter vários indicadores estatísticos, tais como, erro padrão, soma dos quadrados das discrepâncias e coeficiente de determinação (R^2), que avaliam a qualidade das análises geoestatísticas. No entanto optou-se por considerar as estimativas do *Root Mean Square* das discrepâncias (RMS_d), da média das discrepâncias²³ (EM_d), do coeficiente de determinação (R^2) e dos parâmetros da regressão linear simples entre os valores observados e os preditos, coeficiente angular (a) e linear (b).

De acordo com Santos (2011) o RMS_d tem acurácia se o modelo adotado para o semivariograma teórico tiver. Neste caso o RMS_d será tão melhor quanto menor. Da mesma forma espera-se um EM_d tão próximo de zero quanto possível, indicando precisão na estimação. O R^2 será ótimo quando for igual à unidade, o mesmo ocorre para o coeficiente angular (a) da reta. Já o coeficiente linear (b) será ótimo quando o mesmo for nulo.

Os resultados da validação cruzada realizada para a krigagem *default* foram comparados com os resultados obtidos da validação cruzada correspondente a krigagem realizada pelo analista, aqui denominado krigagem supervisionada, respeitando-se as etapas que antecedem a interpolação. Segundo Camargo (1998), as etapas de uma análise geoestatística devem consistir da análise exploratória dos dados, geração e modelagem dos semivariogramas, validação do modelo, interpolação e predição da incerteza.

²³ Médias das discrepâncias, equivalente ao erro médio citado em algumas bibliográficas.

A análise exploratória é um procedimento importante, pois permite detectar a existência de dados discrepantes (*outliers*) e/ou tendências que podem afetar a identificação e interpretação da dependência espacial através do semivariograma. Basicamente, essa etapa se baseia na construção e interpretação de gráficos e de estatísticas (GUIMARÃES, 2004; VILELA, 2004). Neste trabalho a análise exploratória consistiu na obtenção dos gráficos de tendência, estimação da média, variância, desvio-padrão, coeficiente de variação (CV), valor máximo, valor mínimo, assimetria, curtose e realização de testes para a detecção de *outliers*.

Após a etapa de análise exploratória, continuou-se o estudo com a análise variográfica. Com o intuito de verificar a existência de anisotropia, construíram-se os semivariogramas para as direções: N-S (0°), E-W (90°), NE-SW (45°) e SE-NW (135°). Após o cálculo dos valores de $\gamma(\Delta d)$, foram analisadas as estruturas espaciais obtidas, tendo-se construído, em função destas e do conhecimento do fenômeno em estudo, os modelos de semivariograma teóricos que melhor se ajustaram aos semivariogramas experimentais.

Após a modelagem do semivariograma, se constatada a existência de dependência espacial, pode-se estimar valores não amostrados, sem viés e com variância mínima. O interpolador que utiliza as informações geradas pelo semivariograma em sua modelagem é chamado de krigagem (VIEIRA, 2000).

3.3.5.2. Análise da qualidade da representação computacional de superfícies batimétricas utilizando os interpoladores inverso ponderado da distância e krigagem na presença de dados esparsos e abundantes

Visando atingir os objetivos, o arquivo original, contendo 1414 pontos, aqui denominado GRID1, foi dividido de forma aleatória em outros dois arquivos, o GRID2, contendo 706 pontos, e o GRID3, contendo 359 pontos. Aplicou-se a Krigagem e o Inverso Ponderado da Distância aos GRID1, GRID2 e GRID3, objetivando comparar a eficiência de ambos os interpoladores na presença de muitos e poucos pontos amostrais.

Primeiramente foi utilizada a krigagem supervisionada para interpolar os GRID1, GRID2 e GRID3 seguindo a metodologia utilizada na seção anterior. Para a interpolação utilizando o Inverso Ponderado da Distância testaram-se algumas potências adotando aquela que apresentou melhores resultados. Utilizou-se um valor mínimo de 10 e um valor máximo de 15 pontos amostrados mais próximos da localidade a ser interpolada, sendo que para a

krigagem levou-se em consideração apenas os pontos que estivessem dentro do raio de alcance da dependência espacial obtido por cada atributo.

A avaliação dos interpoladores seguiu a metodologia já discutida na seção 3.3.5.1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Coordenadas dos marcos de apoio e da referência de nível

A Tabela 2 mostra as coordenadas UTM (Projeção Universal Transversa de Mercator) fixas da base VICO e dos marcos M0 e M1, bem como o desvio padrão destas coordenadas estimadas após processamento e ajustamento a um nível de confiança de 95 %, ambas referenciadas ao sistema geodésico WGS-84, compatível com o SIRGAS 2000.

Tabela 2. Coordenadas planimétricas da VICO, M0 e M1.

Marco	E (m)	Desvio Padrão (m) (Nível de Confiança de 95 %)	N (m)	Desvio Padrão (m) (Nível de Confiança de 95 %)
VICO	721757,711	0	7702785,751	0
M0	721759,120	0,002	7702267,492	0,003
M1	721742,876	0,002	7702304,405	0,002

A Tabela 3 mostra a altitude ortométrica da estação altimétrica - RN 3307F do IBGE, do marco M0 e do nível da superfície da água no dia do levantamento, este último foi usado como NR para o levantamento batimétrico.

Tabela 3. Altitude ortométrica da RN, M0 e NR.

Ponto	Altitude Ortométrica (m)
RN 3307F	656,3445
M0	656,2214
NR	655,4984

4.2. Levantamento topográfico planimétrico e batimétrico

A Tabela 4 mostra os erros cometidos no levantamento topográfico planialtimétrico.

Tabela 4. Erros cometidos no levantamento topográfico planialtimétrico.

	Erro
Angular	15"
Linear	4,9 mm
Altimétrico	75 mm
Relativo linear	1/66379

Através do levantamento topográfico planimétrico gerou-se uma planta dos arredores e limites da área de estudo. Tanto para os dados topográficos quanto para os batimétricos adotou-se a projeção cartográfica UTM, meridiano central -45° , referenciada ao sistema geodésico SIRGAS 2000.

Durante o levantamento batimétrico não foi possível percorrer todas as linhas planejadas, principalmente as próximas à margem, devido à existência de muitos troncos que impossibilitaram a navegação. Nas proximidades da margem também ocorreram muitas perdas de sinal por parte do ecobatímetro, devido à baixa profundidade (menor que 1 metro), e por parte do RTK, devido à presença de mata densa em uma das margens.

Para contornar as perdas de sinal e gerar redundância de dados, facilitando a posterior análise da qualidade do levantamento, foram realizadas duas sondagens, percorrendo-se as mesmas linhas planejadas. Estas foram editadas e analisadas separadamente. Posteriormente os dados foram combinados formando um único arquivo de coordenadas tridimensionais (arquivo “XYZ”).

4.3. Análise da precisão do levantamento batimétrico

Conforme explanado na seção 3.3.4, efetuou-se a avaliação da qualidade do levantamento a partir dos perfis de verificação. A avaliação do levantamento foi efetuada usando-se as linhas sondadas na frequência de 210 kHz.

Para 100% dos dados do grupo amostral utilizado na verificação, as diferenças entre as profundidades obtidas nos perfis de sondagem e nos de verificação foram inferiores a 0,20 m, como pode ser visto no Apêndice A.

No módulo *Cross Statistics* do *Hypack*, através da diferença entre 136 intersecções, foram gerados os índices estatísticos: desvio padrão das diferenças (σ_{erro}), que foi de 0,09 m, e a média das diferenças ($\sigma_{média}$), que foi de 0,04 m. Com estes índices foi calculado o IVT_{LV} , ao nível de confiança de 95%, a partir da Equação (6), resultando em 0,18 m.

A Tabela 5 apresenta o IVT_{Max} calculado através da Equação (4), utilizando-se a profundidade média, que foi de 4,18 m, e todas as ordens presentes na Tabela 1.

Tabela 5. Incerteza Vertical Total máxima para cada ordem.

Ordem	Especial	1a	1b	2
IVT_{Max} (m)	0,25	0,50	0,50	1,00

Confrontando o IVT_{LV} com o IVT_{Max} de cada ordem, conclui-se que o levantamento batimétrico está de acordo com os padrões de qualidade estipulados pela IHO, e seguidos pela DHN. Vale salientar que as ordens “especial” e “1a” requerem a busca total do fundo, sendo necessário, desta forma, utilizar um sistema de varredura. Sendo assim, aqui se apresenta estes resultados apenas a título de exemplificação.

4.4. Geração do modelo digital de Profundidade

Os dados de profundidade provenientes do levantamento batimétrico foram utilizados para geração do MDP da área em estudo. Conforme já discutido, neste trabalho dividiu-se o estudo referente à representação gráfica da superfície batimétrica em dois tópicos.

Através do *software Topograph* foi possível calcular os volumes aproximados de água e de lama fluídica da área sondada. A diferença entre os volumes calculados para as frequências 33/210 kHz corresponde a uma estimativa do volume total de lama fluídica depositada no fundo submerso. Os volumes são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Volume estimado de água e de lama fluídica.

	Volume (m ³)
Frequência Alta (Volume de Água)	29657
Frequência Baixa (Volume de Água + Lama)	30156
Lama Fluídica	499

4.4.1. Estudo sobre a utilização adequada da krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas

A krigagem ordinária no modo *default* foi realizada no *software* GS+ versão 7.0. Para tal, primeiramente, deve-se efetuar o cálculo do semivariograma. Vale salientar que o GS+, no modo *default*, desconsidera qualquer anisotropia ou tendência. Para ajustar os modelos, o GS+ aplica o método dos mínimos quadrados e seleciona o modelo que apresentar a menor

soma dos quadrados dos resíduos. Os resultados gerados pelo GS+ foram: modelo esférico, com efeito pepita de 0,001 m², patamar de 1,373 m² e um alcance de 61,1 m. O patamar deveria estimar a variância amostral, porém, como pode ser visto na linha pontilhada do semivariograma (Figura 6), isto não acontece.

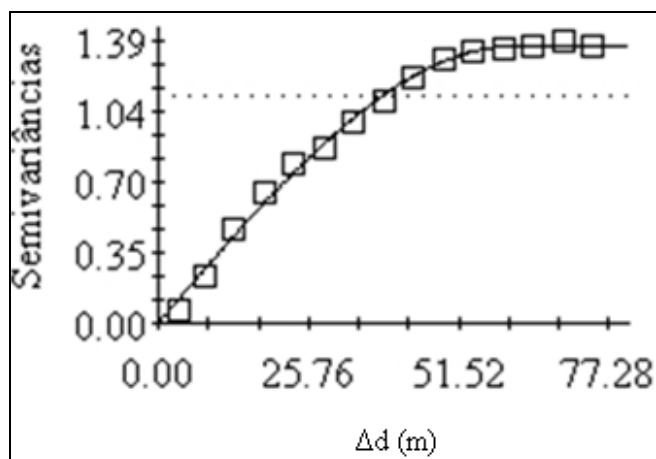


Figura 6 - Semivariograma isotrópico experimental e modelo ajustado.

Construído o semivariograma, o próximo passo consiste em realizar a validação cruzada (uma simples apresentação já que a krigagem está sendo feita pelo auto-ajuste), feita também no *software* GS+. Posteriormente exportou-se o arquivo gerado para o *software* Excel 2007 onde foi possível avaliar a precisão da estimação através do cálculo do *Root Mean Square* das discrepâncias (RMS_d), da média das discrepâncias (EM_d), do coeficiente de determinação (R^2) e dos parâmetros da regressão linear simples entre os valores observados e os preditos, coeficiente angular (a) e linear (b). Os resultados da validação cruzada são apresentados na Tabela 8.

Ressalta-se a opção pela utilização do *software* Excel 2007, porque alguns índices estatísticos escolhidos e recomendados na literatura para avaliar a interpolação não são fornecidos pelos *softwares* utilizados na análise.

O passo seguinte foi a realização da interpolação através da krigagem ordinária. Nesta tarefa utilizou-se o *ArcGIS* 10, visando uma padronização dos MDPs. O MDP gerado e seu respectivo mapa de incertezas são mostrados na Figura 7 e Figura 8, respectivamente.

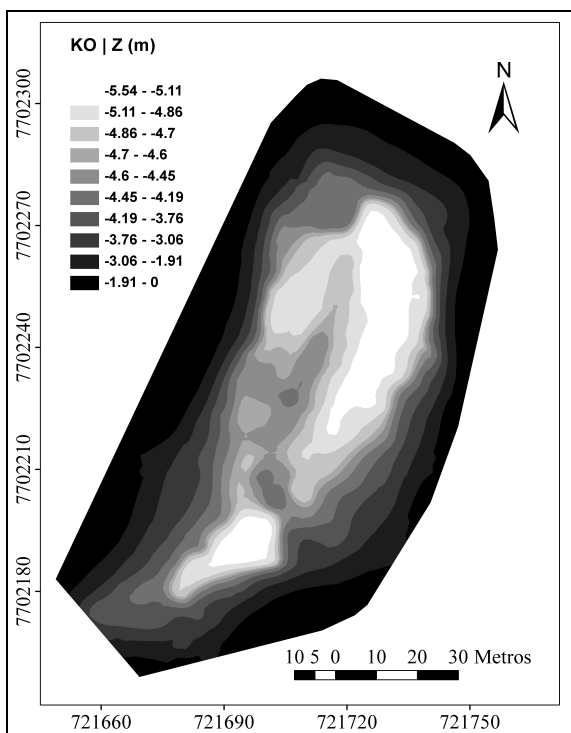


Figura 7 - MDP construído com base na krigagem ordinária *default*.

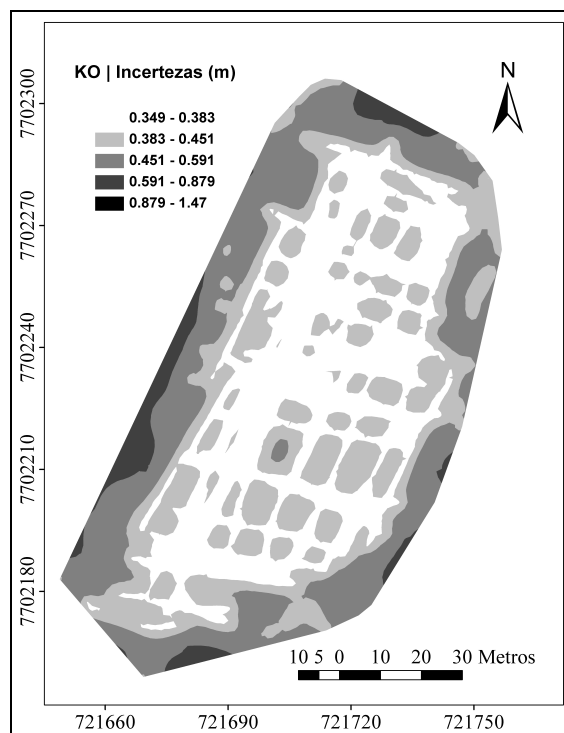


Figura 8 - Mapa de incertezas das estimativas de profundidade construído com base na krigagem ordinária *default*.

Para atingir o objetivo proposto nesse trabalho, passa-se a apresentar a krigagem supervisionada, seguindo as etapas propostas por Camargo (1998).

Conforme já discutido qualquer análise geoestatística inicia-se com a análise exploratória dos dados. Os resultados da análise exploratória dos dados podem ser vistos na Tabela 7 e na Figura 9.

Tabela 7. Estatística descritiva da batimetria do represamento do Ribeirão São Bartolomeu.

Profundidade Média (m)	4,18
Mediana (m)	4,46
Variância (m ²)	1,12
Desvio Padrão (m)	1,06
CV (%)	25,32
Profundidade Máxima (m)	5,54
Profundidade Mínima (m)	0
Assimetria	2,09 ± 0,07
Curtose	5,57 ± 0,13

Pôde-se perceber que os dados apresentam uma variabilidade média, considerando os valores da variância e desvio padrão amostral. Tal variabilidade é confirmada pela medida do coeficiente de variação, baseado nos limites propostos por Warrick e Nielsen (1980), que consideram: variabilidade baixa ($CV < 12\%$); média ($12\% \leq CV \leq 60\%$) e alta ($CV > 60\%$). Tal fato favorecerá a quantificação da incerteza da predição. Ressalta-se, ainda, a assimetria à direita (Figura 9), apresentada pelas estimativas da média, mediana e pelo coeficiente de assimetria, o que destaca a forma do represamento do Ribeirão São Bartolomeu. Analisando a Figura 9, nota-se a presença de alguns valores distantes da média, estes podem ser possíveis *outliers*, no entanto, as profundidades de valor 0 correspondem a margem do represamento, não sendo, desta forma, valores discrepantes. A ausência de informação entre as profundidades 1.85 e 0 é devido a dificuldade em se navegar nas proximidades da margem da área de estudo.

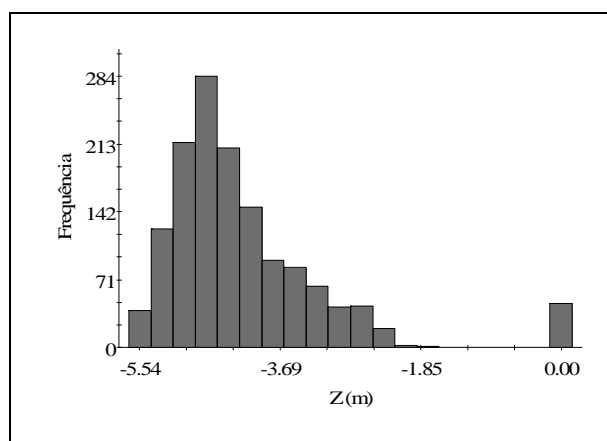


Figura 9 - Distribuição de frequências da variável profundidade (Z) da batimetria do represamento do Ribeirão São Bartolomeu.

Considerando tais resultados, pode-se perceber que os valores médios não representam adequadamente as amostras obtidas, resultando em interpolações não condizentes com a batimetria do local em estudo, através dos métodos *default*, implementados nos *softwares*.

Assim, passa-se a analisar detalhadamente as características espaciais dos dados antes da correta interpolação via krigagem. Continuando com a análise procedeu-se com a verificação de presença de tendência nos dados. Para tal, construiu-se o gráfico de tendência no ArcGIS 10 (Figura 10).

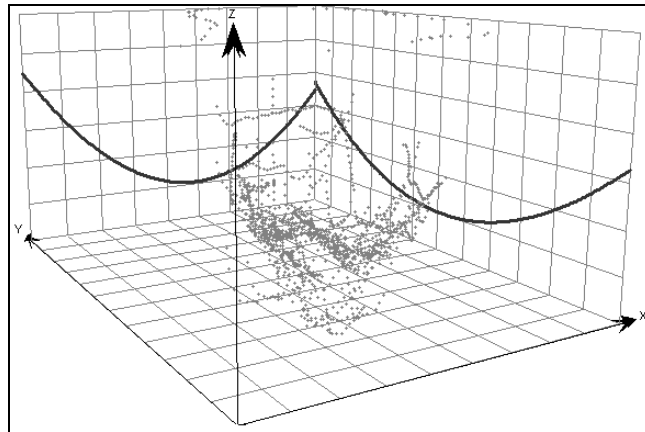


Figura 10 - Gráfico mostrando a tendência de segunda ordem presente nos dados.

Analisando a Figura 10 pode-se notar a presença de tendência de segunda ordem nos dados de profundidade presentes nas curvas projetadas nos planos verticais, o que está de acordo com a realidade, pois trata-se de um reservatório com pronunciada inclinação. Constatada a presença de tendência deve-se eliminá-la antes de se continuar com a análise geoestatística. Diante dessa característica dos dados, opta-se por aplicar a krigagem universal. Esta, segundo Santos (2011), aplica um ajuste de polinômios de baixo grau para a remoção da tendência e trabalha-se com os resíduos.

Com o intuito de verificar a existência de anisotropia calcularam-se os semivariogramas para as direções: N-S (0°), E-W (90°), SW-NE (45°) e NW-SE (135°) (Figura 11). Salienta-se que conforme citado no tópico anterior, optou-se por trabalhar com a krigagem universal, neste caso, os semivariogramas aqui construídos correspondem aos semivariogramas dos resíduos.

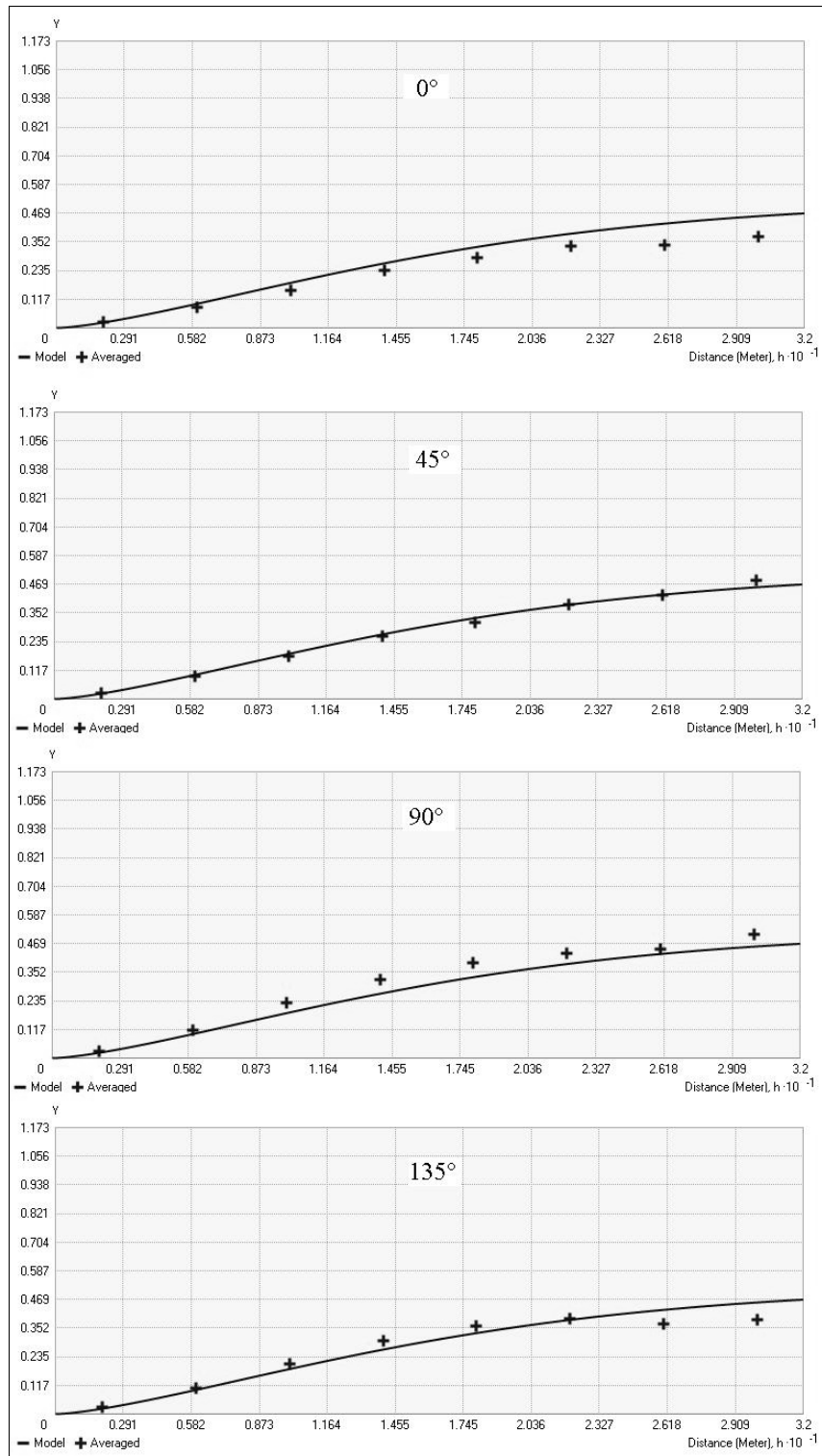


Figura 11 - Semivariogramas experimentais direcionais e modelos ajustados das direções: N-S (0°), E-W (90°), SW-NE (45°) e NW-SE (135°).

Através dos semivariogramas mostrados na Figura 11 nota-se que a variável profundidade apresenta padrões de dependência espaciais praticamente idênticos até o alcance, ou seja, apresenta a mesma variabilidade espacial em todas as direções, logo se conclui que o fenômeno é isotrópico. Desta forma pode-se utilizar um único semivariograma que representa todas as direções, denominado semivariograma omnidirecional.

Sendo assim procede-se com o ajuste do semivariograma no ArcGIS 10, após muitas tentativas, conseguiu-se um ajuste bastante realista para o semivariograma omnidirecional. O modelo teórico que melhor se ajustou ao modelo experimental foi o *stable*, com efeito pepita de 0 m², patamar de 0,5201 m² e um alcance de 38,388 m. O modelo *stable* é uma combinação dos modelos exponencial e gaussiano. Neste modelo deve-se definir um parâmetro, que varia de 0 a 2, sendo que o valor nulo, torna o modelo *stable* idêntico ao modelo exponencial, e se o parâmetro é definido como 2, o modelo passa a ser o gaussiano. O valor do parâmetro definido neste estudo foi de 1,432227. O semivariograma omnidirecional experimental e o modelo ajustado podem ser vistos na Figura 12.

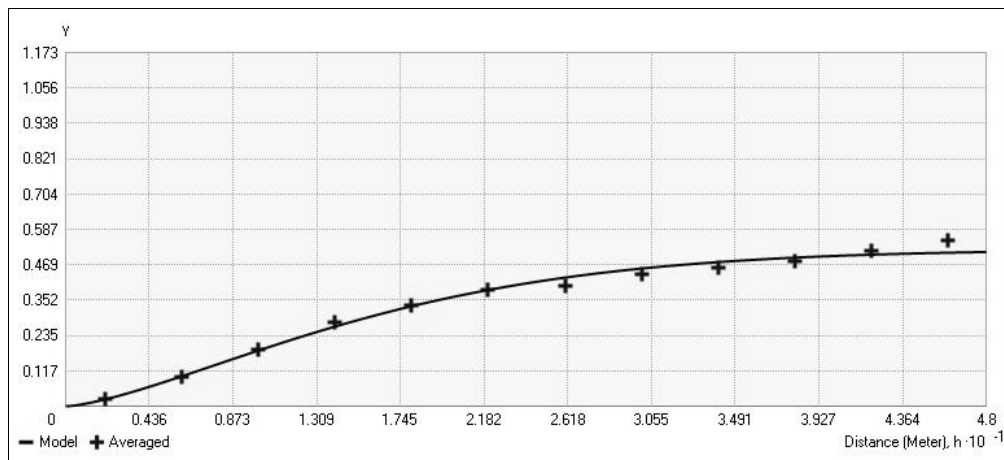


Figura 12 - Semivariograma omnidirecional experimental e modelo ajustado.

Construído o semivariograma, passa-se a apresentar os resultados da validação cruzada realizada para a Krigagem *default* e para a Krigagem supervisionada.

Tabela 8 – Principais estatísticas da validação cruzada.

	RMS _d	EM _d	R ²	a	b
Krigagem <i>Default</i>	0,225	0,01	0,960	0,959	-0,166
Krigagem supervisionada	0,123	-0,002	0,986	0,995	-0,018

Analisando a Tabela 8 nota-se, através de todos os parâmetros de decisão adotados, que a krigagem realizada pelo analista (supervisionada) possui maior precisão quando comparada com a krigagem *default*, pois o RMS desta é 45,3% menor. Em termos de discrepância média a melhora foi ainda maior, cerca de 80%. Além disso, conforme recomenda Vieira (2000), a regressão linear simples entre valores observados e preditos deve apresentar R^2 bem próximo da unidade, assim como o coeficiente da regressão “a” e o intercepto “b” bem próximo de zero. Para a Krigagem supervisionada todos os 3 parâmetros foram melhor estimados do que na krigagem *default*, sendo um resultado importante para o objetivo do estudo.

Conforme citado, utiliza-se a krigagem universal para estimar os pontos nos locais não amostrados. O MDP e seu respectivo mapa de incertezas são mostrados na Figura 13 e Figura 14, respectivamente.

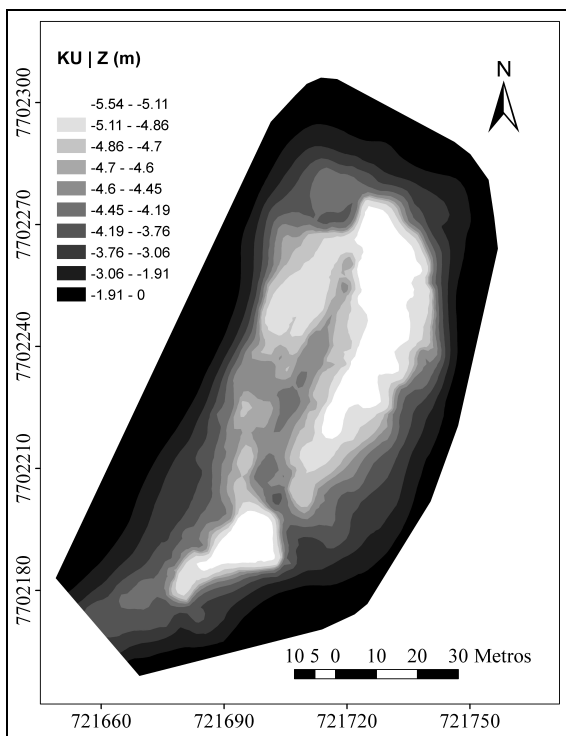


Figura 13 - MDP construído com base na krigagem universal.

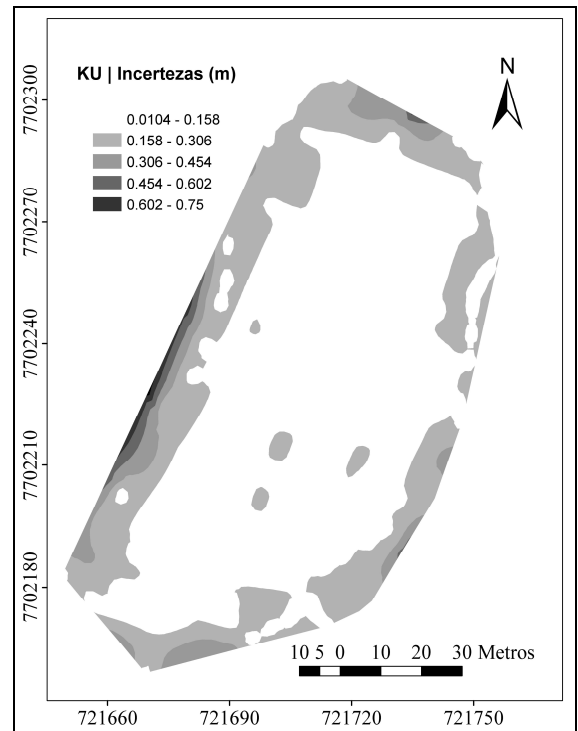


Figura 14 - Mapa de incertezas das estimativas de profundidade construído com base na krigagem universal.

Comparando os MDP gerados pela krigagem ordinária *default* (Figura 7) e a krigagem universal (Figura 13) não se percebe visualmente grandes diferenças, porém nota-se que a krigagem universal representa a profundidade de forma mais acurada. Quando se compara o mapa de incertezas de ambas, a diferença é significativa (Ver apêndice B). Na Figura 8 nota-

se que as incertezas da krigagem *default* variaram de 0,35 à 1,47 m, enquanto que para a krigagem universal (Figura 14) estas variaram de 0,01 à 0,75 m, sendo nítida a prevalência dos valores entre 0,01 e 0,16 m. Em outras palavras, se a análise geoestatística não for realizada de forma correta, os erros associados às estimativas por krigagem tornam-se bem maiores. Outrossim, na krigagem *default* não se percebe características do estudo que interferem diretamente nas predições, como é o caso da anisotropia e tendência.

Em termos práticos, uma das finalidades de se construir modelos digitais de profundidade de corpos aquáticos é posteriormente efetuar o cálculo do volume do mesmo. Sendo assim, efetuou-se o cálculo do volume visando-se verificar a ocorrência de diferenças significativas. Para a krigagem ordinária, efetuada de forma automática, o volume estimado do reservatório foi aproximadamente 32421 m³, enquanto que para a krigagem universal, efetuada pela analista, o volume foi aproximadamente 30318 m³, uma diferença de aproximadamente 7%.

4.4.2. Análise da qualidade da representação computacional de superfícies batimétricas utilizando os interpoladores inverso ponderado da distância e krigagem na presença de dados esparsos e abundantes

A Tabela 9 apresenta os resultados da análise exploratória efetuada para o GRID1, GRID2 e GRID3.

Tabela 9 - Informações estatísticas das profundidades do represamento do ribeirão são Bartolomeu.

	GRID1	GRID2	GRID3
Profundidade Média (m)	4,18	4,17	4,14
Mediana (m)	4,46	4,45	4,46
Variância (m ²)	1,12	1,15	1,44
Desvio Padrão (m)	1,06	1,07	1,20
CV (%)	25,32	25,66	28,98
Profundidade Mínima (m)	0	0	0
Profundidade Máxima (m)	5,54	5,53	5,53
Assimetria	2,09	2,08	2,01
Curtose	5,57	8,45	7,40

Em geral, pode-se perceber que os dados apresentam uma variabilidade média, considerando os valores da variância e desvio padrão amostral. Tal variabilidade é confirmada pela medida do coeficiente de variação, baseado nos limites propostos por Warrick e Nielsen (1980). Nota-se, através do coeficiente de variação, desvio padrão e variância, uma maior variação amostral no GRID3, comparativamente ao GRID1 e 2, o que desfavorecerá a predição. Conforme já citado, os valores de profundidade nula não são valores atípicos.

Continuando com a análise exploratória construiu-se o gráfico de tendência utilizando-se o programa computacional ArcGIS 10 para o GRID1 (Figura 15), GRID2 (Figura 16) e GRID3 (Figura 17).

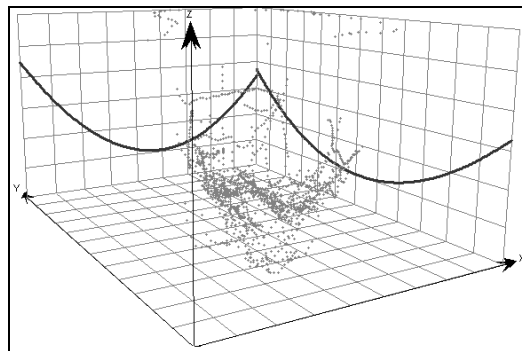


Figura 15 - Gráfico mostrando a tendência de segunda ordem presente nos dados do GRID1.

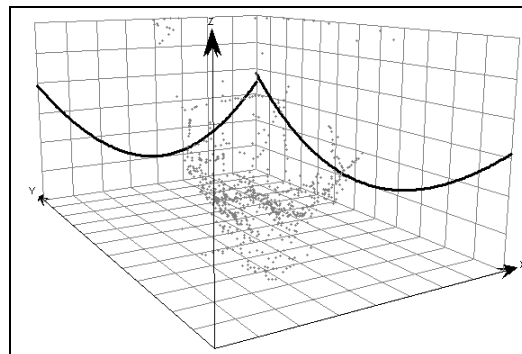


Figura 16 - Gráfico mostrando a tendência de segunda ordem presente nos dados do GRID2.

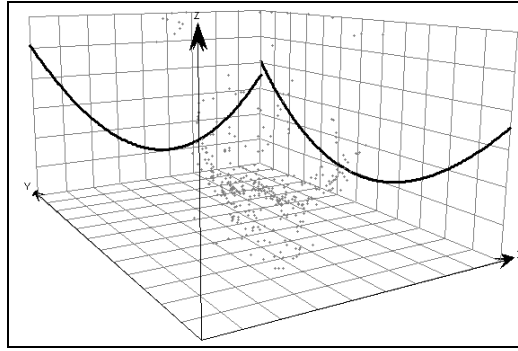


Figura 17 - Gráfico mostrando a tendência de segunda ordem presente nos dados do GRID2.

Em todos os GRIDS percebe-se a presença de tendência de segunda ordem nos dados de profundidade, vista nas parábolas expostas nos planos verticais, o que está de acordo com a realidade, pois trata-se de um reservatório com pronunciada inclinação. Constatada a presença de tendência busca-se a interpolação Geoestatística apropriada. Diante dessa característica dos dados, opta-se por aplicar a krigagem universal (KU). Esta, segundo Santos (2011), aplica um ajuste de polinômios de baixo grau para a remoção da tendência e trabalha-se com os resíduos. Com o intuito de verificar a existência de anisotropia calcularam-se os semivariogramas para as direções: N-S (0°), E-W (90°), SW-NE (45°) e NW-SE (135°) (Figura 11 – seção 4.4.1).

Analisando os semivariogramas do GRID1 mostrados na Figura 11 percebe-se que a variável profundidade apresenta a mesma variabilidade espacial em todas as direções, logo se conclui que o fenômeno é isotrópico. Desta forma pode-se utilizar um único semivariograma que representa todas as direções, denominado semivariograma omnidirecional. Sendo assim procedeu-se com o ajuste do semivariograma através do software ArcGIS 10. Obteve-se um semivariograma omnidirecional que representa a tendência de $\gamma(\Delta d)$ em relação à Δd . A mesma análise foi realizada para os GRIDS 2 e 3, onde não foi constatada a presença de anisotropia. Os modelos teóricos escolhidos para cada GRID encontram-se resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Modelos teóricos de semivariograma.

KU	Modelo	Pepita (m ²)	Patamar (m ²)	Alcance (m)
GRID 1	Stable	0,000	0,520	38,388
GRID 2	Gaussiano	0,017	0,390	23,570
GRID 3	Esférico	0,037	0,666	53,497

O semivariograma omnidirecional experimental e o modelo ajustado podem ser vistos para o GRID1 na Figura 18, para o GRID2 na Figura 19 e para o GRID3 na Figura 20.

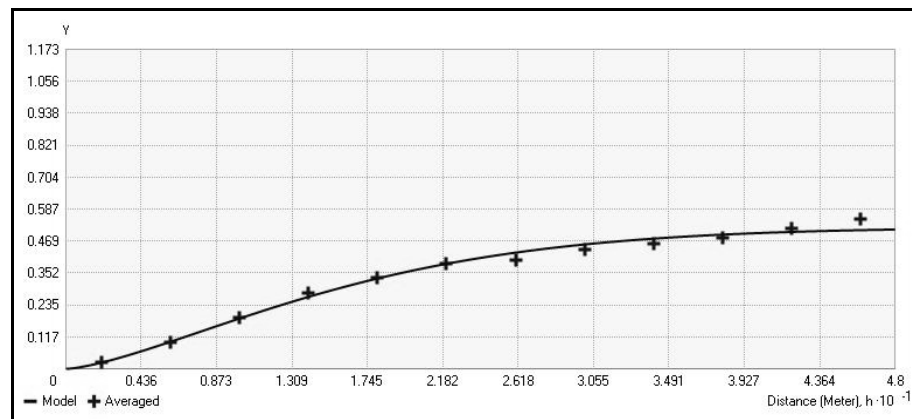


Figura 18 - Semivariograma omnidirecional experimental e modelo ajustado para o GRID1.

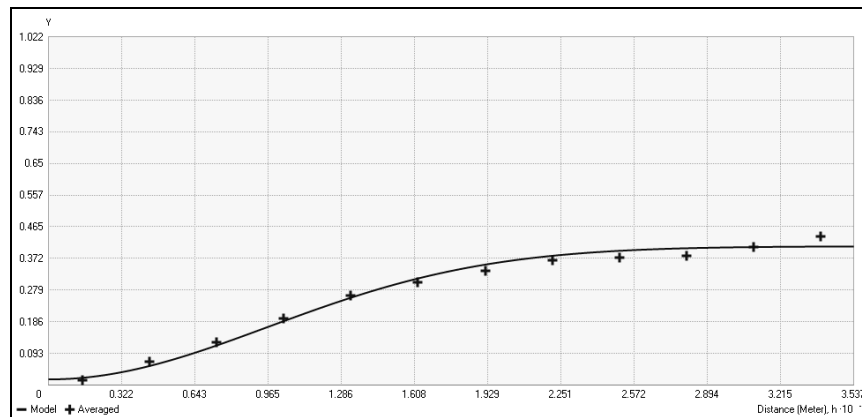


Figura 19 - Semivariograma omnidirecional experimental e modelo ajustado para o GRID2.

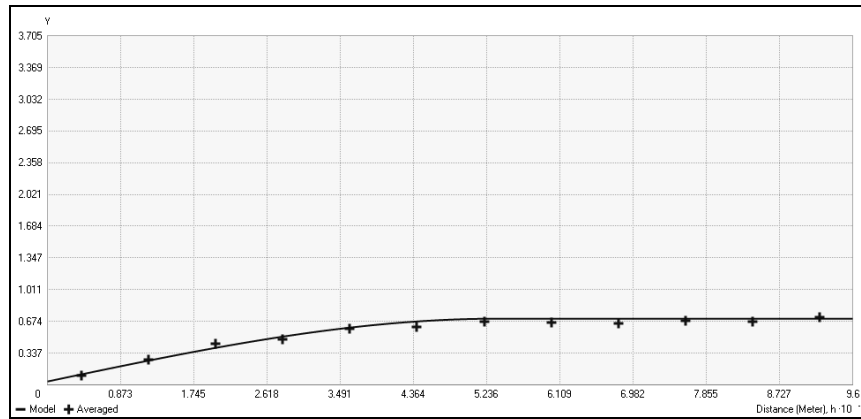


Figura 20 - Semivariograma omnidirecional experimental e modelo ajustado para o GRID3.

Após a obtenção do semivariograma pode-se efetuar a interpolação pela krigagem universal. Antes da interpolação é realizada a validação cruzada para avaliar o desempenho dos interpoladores. Os resultados da mesma serão apresentados no decorrer do texto. Conforme citado, utilizou-se a krigagem universal para estimar os pontos nos locais não amostrados.

Para a interpolação utilizando o inverso ponderado da distância, primeiramente, definiu-se o número de vizinhos a serem utilizados na interpolação. Adotou-se um valor mínimo de 10 e um valor máximo de 15 pontos amostrados mais próximos da localidade a ser interpolada. O próximo passo consistiu-se em um estudo para definir o valor do expoente utilizado na ponderação, este foi escolhido analisando-se diversos fatores, como as características da área e o valor do RMS_d obtido da validação cruzada, tal como sugere Mesquita (2009). Testou-se expoentes variando de 1 a 5, os resultados podem ser vistos na Figura 21.

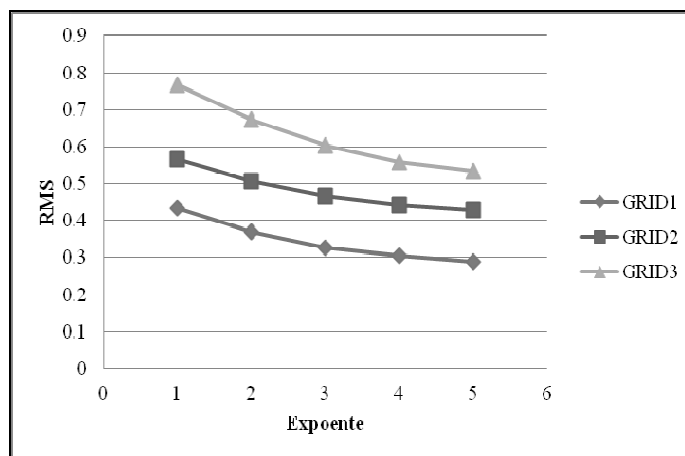


Figura 21 - Gráfico Expoente x RMS_d .

Analisando a Figura 21 torna-se óbvia a escolha de expoentes maiores para ambos os GRIDS, porém deve-se tomar cuidado com tal escolha. Conforme alerta Landim (2000) a escolha do expoente tem os seguintes efeitos sobre os resultados estimados: os expoentes baixos destacam as anomalias locais, enquanto que expoentes altos suavizam as anomalias locais, ou seja, o expoente controla a importância dos pontos em torno do valor estimado, sendo que potências maiores resultam em menos influências de pontos distantes. Notou-se que os expoentes menores, além de destacarem as anomalias locais, proporcionam uma superfície mais lisa, este fato é explicado, pela maior ponderação dada aos pontos mais distantes. O expoente maior, de valor 5, apesar de fornecer um valor de RMS_d menor, em torno de 0,290, para o GRID1, 0,428 para o GRID2 e 0,535 para o GRID 3, fornece uma superfície mais detalhada, ou seja, menos suave. Tal fato deve-se a maior ênfase dada aos pontos mais próximos. Diante do exposto optou-se por utilizar o expoente de valor 2, devido, principalmente as características da área de estudo aliado a vasta utilização deste expoente na literatura especializada (MORILLO BARRAGÁN *et al.*, 2002; SILVA, *et al.*, 2008; SOUZA *et al.*, 2010). Salienta-se que quando se opta pelo expoente de valor 2, o inverso ponderado da distância passa a se chamar inverso do quadrado da distância (IQD).

O resultado da validação cruzada é mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 - Principais estatísticas da validação cruzada.

GRID 1 – 1414 pontos amostrais					
	RMS_d (m)	EM_d (m)	R^2	a	b (m)
KU	0,123	0,002	0,986	0,995	-0,018
IQD	0,369	0,061	0,903	0,911	-0,393
GRID 2 – 706 pontos amostrais					
	RMS_d (m)	EM_d (m)	R^2	a	b (m)
KU	0,194	0,003	0,966	0,976	-0,108
IQD	0,507	0,092	0,821	0,884	-0,514
GRID 3 – 359 pontos amostrais					
	RMS_d (m)	EM_d (m)	R^2	a	b (m)
KU	0,367	0,008	0,902	0,985	-0,067
IQD	0,675	0,154	0,772	0,784	-0,975

Analisando a Tabela 11, GRID a GRID, nota-se, através de todos os parâmetros de decisão adotados, que a KU propiciou uma maior acurácia, em ambos os GRIDS, quando comparada com o IQD, fato justificado pelos valores de RMS_d e EM_d . Além disso, conforme recomenda Vieira (2000), a regressão linear simples entre valores observados e preditos deve apresentar R^2 bem próximo da unidade, assim como o coeficiente da regressão “a” e o intercepto “b” bem próximo de zero. Para a KU todos os 3 parâmetros foram melhor estimados do que no IQD, sendo um resultado importante para o objetivo do trabalho. Outro resultado que se verifica é a KU realizada para o GRID3 (menor número de pontos amostrais) quando comparada com o IQD realizado para o GRID1 (maior número de pontos amostrais) ainda assim possui maior acurácia, fato justificado pelos valores de RMS_d e EM_d , revelando que a Krigagem, na modelagem computacional da superfície batimétrica desta área de estudo, é mais acurada que o IQD até mesmo em situações desfavoráveis.

Em termos práticos, uma das finalidades de se construir modelos digitais de elevação de corpos aquáticos é posteriormente efetuar o cálculo de volumes. Sendo assim, efetuou-se o cálculo do volume do reservatório levantado visando-se verificar a ocorrência de diferenças significativas. Os resultados podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 12 - Volumes calculados para cada interpolador e GRID amostral

INTERPOLADOR		VOLUME (m ³)
GRID 1	KU	30318
	IQD	32689
GRID 2	KU	30155
	IQD	33203
GRID 3	KU	31118
	IQD	33933

Para o GRID1, ao comparar a KU com o IQD, verifica-se uma diferença de 2371 m³, para o GRID2 a diferença é ainda maior, cerca de 3000 m³, já para o GRID3 houve uma diferença de aproximadamente 2800 m³. Quando se considera a KU para o GRID1 como a interpolação mais acurada, fato justificado na Tabela 11, ao aplicar a KU no GRID2 e GRID3 tem-se as seguintes discrepâncias no cálculo de volume, respectivamente: 163 m³ (0,5%) e 800 m³ (2,6%). Enquanto que ao aplicar o IQD no GRID2 e GRID3, ainda considerando a KU para o GRID1 como a interpolação mais acurada, tem-se as seguintes discrepâncias no cálculo de volume: respectivamente, 2885 m³ (9,5%) e 3615 m³ (11,9%). Este é outro fato que transmite a acurácia da Geoestatística frente ao método determinístico aqui estudado.

Como o GRID1 apresenta-se mais acurado para ambos os interpoladores apresenta-se a seguir os MDP gerados a partir do GRID1 para a interpolação realizada pelo IQD (Figura 22). O MDP e seu respectivo mapa de incertezas gerados através da KU são mostrados, respectivamente, na Figura 13 e Figura 14 da seção 4.4.1.

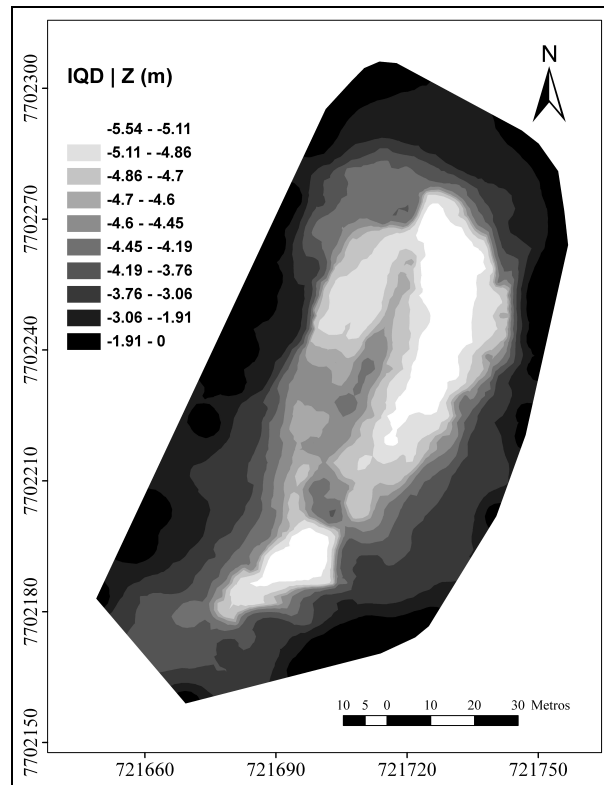


Figura 22 - MDP construído com base no IQD.

Analisando os MDPs gerados pela KU e IQD nota-se algumas diferenças. A superfície gerada pela krigagem universal, para ambos os GRIDS, cria uma forma de relevo mais uniforme e com contornos suaves. Tal resultado deve-se principalmente ao fato da krigagem ser um interpolador acurado, que ao contrário do IQD, estima além dos limites máximo e mínimo dos valores dos pontos amostrados, sem viés e com variância mínima. Pode-se notar que este interpolador modela tanto tendências regionais quanto anomalias locais, e não é sensível a dados irregularmente amostrados ou agrupados. Uma desvantagem deste interpolador é a complexibilidade matemática de seu algoritmo e o tempo necessário na modelagem do semivariograma. O MDP interpolado pelo IQD para ambos os GRIDS apresentou uma maior variabilidade quando comparado com a KU. Pode-se perceber também que o IQD sofre muita influência de valores locais anômalos, além de ser sensível a dados agrupados, e na presença destes, estima valores de forma bastante tendenciosa. Este

interpolador cria muitos artefatos, principalmente na presença de tendência, como pode ser visto na Figura 22.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os estudos realizados, concluiu-se no geral que a realização de levantamentos batimétricos automatizados, bem como o processamento dos mesmos visando à criação de MDPs precisos, requer profissionais capacitados e com conhecimentos específicos em física, hidrologia, topografia, geodésia, cartografia, ajustamento de observações, desenho assistido por computador e métodos computacionais de representação cartográfica.

Durante o desenvolvimento deste trabalho enfrentou-se muitas dificuldades, principalmente pelo assunto não possuir muitas referências. Em contrapartida todos os equipamentos e *softwares* necessários foram cedidos pela UFV, o que viabilizou alcançar com sucesso todos os objetivos.

No que concerne à construção dos Modelos Digitais de Superfície os levantamentos batimétricos apresentam características ideais para a aplicação da Geoestatística, como, sobretudo a interpolação, denominada Krigagem. Isso se dá, devido à natureza do estudo, da variável (profundidade) e pela grande quantidade de pontos amostrais. Contudo, é comum o procedimento de criação de mapas batimétricos usando a krigagem sem qualquer cuidado quanto aos pressupostos exigidos pela mesma. Através desse estudo, foi possível mostrar e quantificar os erros cometidos ao se ignorar uma análise prévia e minuciosa dos dados antes da interpolação. A krigagem realizada pelo analista (supervisionada) mostrou-se mais precisa quando comparada com a krigagem *default* em todos os parâmetros de decisão adotados. Obteve-se com a krigagem universal, por exemplo, um ganho, em termos de RMS_d , de aproximadamente 45%, enquanto que o erro médio foi cerca de 80% menor. Características comuns em levantamentos desse tipo, como anisotropia e tendência, e a modelagem do semivariograma, comum a todo estudo geoestatístico, só podem ser detectados através de uma análise supervisionada, conforme apresentado nesse trabalho.

Apesar de a krigagem representar a superfície de forma mais acurada ainda é muito comum utilizar métodos determinísticos. Neste estudo, ao comparar a KU com o IQD, verificou-se que o interpolador krigagem apresentou melhores resultados em relação ao interpolador do Inverso da Distância para este conjunto de dados, em GRIDS amostrais esparsos e abundantes. Verificou-se também, que como é de praxe em Engenharia de

Agrimensura, o cálculo de volume do represamento em questão mostrou-se mais acurado quando se aplicou a KU em um GRID amostral esparsos, comparativamente ao IQD aplicado em dados abundantes. Outro diferencial para se optar pelo uso da krigagem é a possibilidade de se gerar um mapa de incertezas da interpolação.

Sendo assim, de acordo com os resultados, recomenda-se a aplicação a Geoestatística na modelagem de superfícies batimétricas, sejam em dados esparsos, ou mesmo abundantes.

Recomendam-se para trabalhos futuros a realização de outros levantamentos batimétricos monofeixe com os mesmos equipamentos utilizados neste estudo, que, após o presente trabalho, encontram-se configurados e prontos para uso. Recomenda-se também a realização de levantamentos multifeixe e por laser aerotransportado; estudos sobre a precisão em levantamentos batimétricos monofeixe e multifeixe, bem como o balanço de erros do sistema de sondagem utilizado; estudos sobre a viabilidade da utilização de dados de sensores remotos de alta resolução para estimativa de profundidades de corpos d'água; estudos sobre a aplicação da técnica RTK para controle da variação do nível d'água durante os levantamentos batimétricos, e ainda estudos mais detalhados sobre a aplicação da krigagem em levantamentos batimétricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR-13133 - **Normas Técnicas para a Execução de levantamentos Topográficos**. 1994

ARTILHEIRO. F; FERNANDO. P; JOÃO. V. **Estimação dos Erros dos Sondadores Multifeixe**. Anais do Instituto Hidrográfico. Marinha de Portugal. Nº 17. 2003-2004.105p

BRASIL. Instrução Técnica A-06A. **Procedimentos para Levantamentos Hidrográficos (LH) Executados por Entidades Extra Marinha**. Ministério da Defesa. Marinha do Brasil. DHN. Disponível em <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/download/ita06.pdf>> acessado em Janeiro de 2011.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: Fundamento e Aplicações. In: CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 1998. Cap 5, 36p.

DIAS, J. A. *et.al.* **Levantamento Batimétrico do Estuário**. Projecto EMERGE, Universidade de Algarve. Portugal. Disponível em <http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks/EMERGE/4_Batimetria_red.pdf> acessado em outubro de 2010.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem Numérica de Terreno. In: CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 1998. Cap 4, 39p.

FELIX, L. A. **Algumas considerações sobre levantamento hidrográfico em grande escala**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1996.

FERREIRA, I. O. **Levantamento batimétrico automatizado aplicando ecobatímetro monofeixe e tecnologia RTK**. Monografia - Curso Engenharia de Agrimensura. Universidade Federal de Viçosa. 2011.

GOTWAY, C.A.; HARTFORD, A.H. **Geostatistical methods for incorporating auxiliary information in the prediction of spatial variables**. J. Agric., Biol. Environ. Statis., 1: 17-39. 1996.

GUIMARÃES, C. L.; RIBEIRO, G.N; VIEIRA, L. J. S. **Levantamento Batimétrico do Açude Paraíso São Francisco – PB**. Revista Verde, v.2, n.1, jan/março 2009.

GUIMARÃES, E. C. **Geostatística Básica e Aplicada**. UFU/FAMAT. Núcleo de estudos estatísticos e Biométricos. 2004.

HYDROBOX. **Manual HydroBox™ Hydrographic Echo Sounder**. 2006. 40p.

HYPACK, Inc. **Manual Hypack Hydrographic Survey Software**. Middletown. 2010. 1395p.

IHO. **IHO Standards for Hydrographic Surveys**. Special Publication N° 44 - 5th. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2008.

IHO. **Manual on Hydrography**. Mônaco: International Hydrographic. Bureau, 2005. 540p.

KANEGAE JÚNIOR, H.; SCOLFORO, J. R.; MELLO, E. J. OLIVEIRA, D. **Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de Eucalyptus sp**. Cerne, v. 12, n. 2, p. 123-136, 2006.

KRUEGER, C. P.; VEIGA, L. A. K.; FAGGION, P. L. **Levantamento Batimétrico no Rio Uruguai**. In: Anais em CD-ROM do XXI CBC, Belo Horizonte, MG, Brasil. 29/Set a 03/Out 2003.

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática,Texto Didático 02, 20 pp. 2000.

LANDIM, P.M.B., STURARO, J.R. & MONTEIRO, R. C. **Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada**. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática,Texto Didático 06, 12 pp. 2002.

LASLETT, G. M.; MCBRATNEY, A. B.; PAHL, P.; HUTCHINSON, M. **Comparison of several spatial prediction methods for soil pH**. J Soil Sci., 38: p. 325 - 341, 1987.

MARTINI, L. **Topografia Aplicada aos Levantamentos Hidrográficos**. Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná. 2007. 19p.

MATIAS, L. **Como Funciona o Sonar: Medição da Velocidade do Som na Água.** Centro de Geofísica, Universidade de Lisboa. Portugal. Disponível em <<http://www.cgul.ul.pt/lmatias/fisica-geologia/Praticas/sonar-s.pdf>> acessado em novembro de 2010.

MESQUITA, S. M. P. **Modelação da distribuição espacial da qualidade do ar em Lisboa usando sistemas de informação geográfica.** Dissertação (Mestrado). Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa. Portugal. 2009. 119p.

MIGUENS, A P. **Navegação: a Ciência e a Arte. v.3 - Navegação Eletrônica e em Condições Especiais.** Rio de Janeiro: DHN, Brasil, 2000. 1822p.

MÔNICO, J. F. **Posicionamento Pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações.** Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia FCT/UNESP- Campus de Presidente Prudente, 2007.

PAIXÃO, S. J. P. **Relatório Levantamento Batimétrico Junto à Área de Implantação da Fábrica de Celulose da Eldorado – Três Lagoas – MS.** Relatório Técnico UMI SAN. Junho de 2010a.

PAIXÃO, S. J. P. **Relatório de Levantamento Batimétrico Multifeixe e Geofísico na área do Pier 1 do Terminal Portuário da Ponta da Madeira – São Luis – MA.** Relatório Técnico UMI SAN. Agosto de 2010b.

PAULO. B. A.; HOLMES. C. E. Projeto de Sistemas Oceânicos II. **Relatório II: Navio para Transporte de Automóveis.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2008/CarlosChads+BrunoAvila/relat2/index.htm> acessado em fevereiro de 2011.

RAMOS, A. M. **Aplicação, Investigação e Análise da Metodologia de Reduções Batimétricas Através do Método GPS Diferencial Preciso.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2007. 221p.

RAMOS, A. M. *et.al.* **Análise Horizontal do Posicionamento GPS Diferencial Empregado em Levantamentos Hidrográficos a Partir de Sistemas DGPS, RTK E RTG.** Disponível em

em

<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/levhidrograficos/Leitura_Analise_de_Acuracia.pdf>

acessado em setembro de 2010.

RIBAS, W. K. **Levantamento Cinemático em Tempo Real (RTK)**. Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A., Curitiba/PR, 2008.

RIBEIRO, S. R.A.; CENTENO, J.A.S.; KRUEGER, C. P. **Estimativa de Profundidade a Partir de Levantamento Batimétrico e Dados IKONOS II Mediante Redes Neurais Artificiais**. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v.14, n.2, p.171-185, abr/jun 2008.

SÁNCHEZ, J. A. C. **Cartografía Submarina**. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales; Universidad Politécnica de Madrid. Disponível em: <<http://www.soy-jacs.com/buceo/articulos/cartografiasub.pdf>> acessado em setembro de 2010.

SANTOS, A. P. **Nivelamento (Tolerâncias e Normas)**. Notas de Aula de EAM 499 - Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica - UFV. 2009. 6p.

SANTOS, G. R.; OLIVEIRA, M. S.; LOUZADA, J. M.; SANTOS, A. M. R. T.. **Krigagem simples versus krigagem universal: qual o preditor mais preciso?**. Energia na agricultura (UNESP. Botucatu. CD-Rom), v. 26, p. 49-55, 2011.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B. **Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão**. Idesia, v. 26, n. 2, p. 75-81, 2008.

SILVEIRA, T. A. **Modelos de interpoladores aplicados a construção de superfícies batimétricas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2010. 81p.

SIMÕES, I. C. V. P. **Aplicação da Batimetria Multifeixe para Definição da Morfologia Detalhada do Fundo Marinho ao Largo da Laguna de Araruama e Arraial do Cabo-RJ**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense. Niterói. Rio de Janeiro. 2007, 122p

SOUZA, E. C. B. **Análises temporais de alta precisão utilizando GPS para avaliação das variações volumétricas ocorridas no ISTMO da Ilha do Mel.** Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésica, UFPR. 2002. 149p.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. S. D. **Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo.** Scientia Agraria, Vol. 11, Núm. 1, enero-febrero, 2010, pp. 73-81.

TABIOS, G. Q.; SALAS, J. D. **A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation.** Walter Rev. Bull. 21, p. 365 - 380, 1985.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In. NOVAES, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E G. R. **Tópicos em ciências do solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.2-54.

VILELA, L. C. **Comparação entre as redes neurais artificiais e o método de interpolação krigagem aplicados à pesquisa agrônômica.** Tese (Doutorado). UNESP. Faculdade de Ciências Agrônômicas. CAMPUS DE BOTUCATU. 2004.

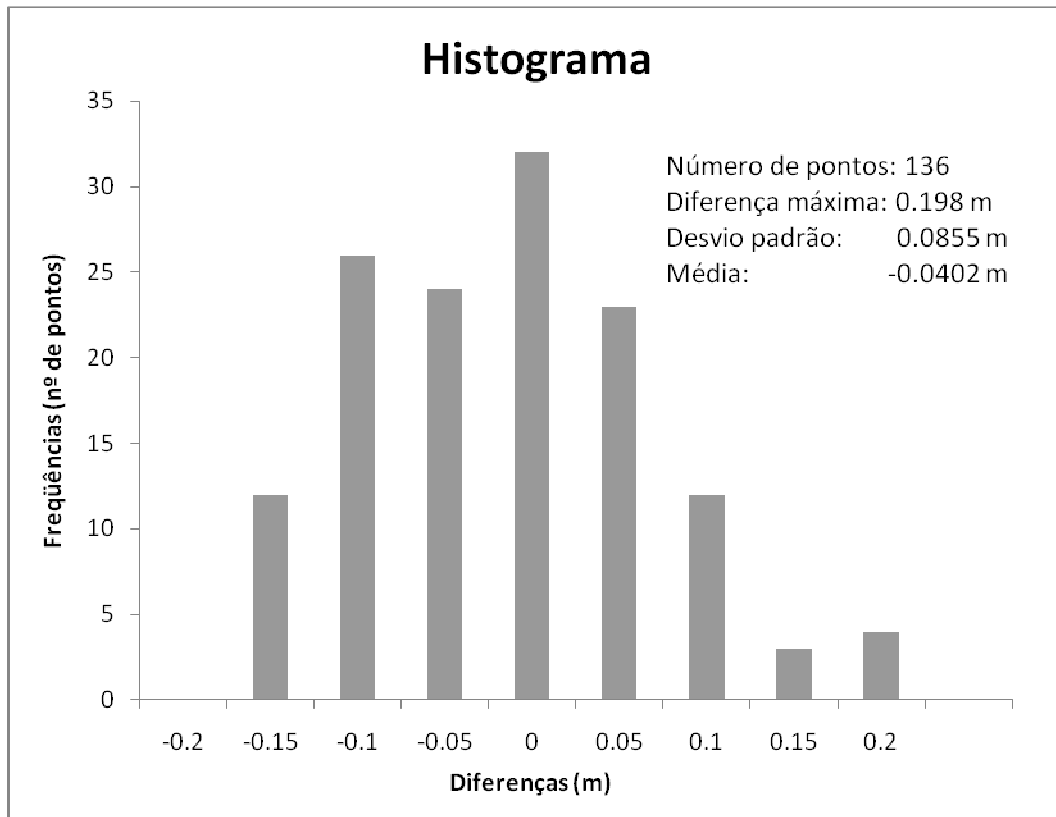
WARRICK, A. W. Z.; HANG, R.; HARRIS, M. R.; MYERS, D. E. **Direct comparisons between kriging and other interpolation validation of flow and transport models for the unsaturated zone.** New Mexico, p. 254 - 326, 1988.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics.** New York: Academic Press. 1980.

WATSON, D. F., and G. M. Philip. **A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation.** Geoprocessing 2:315–327. 1985.

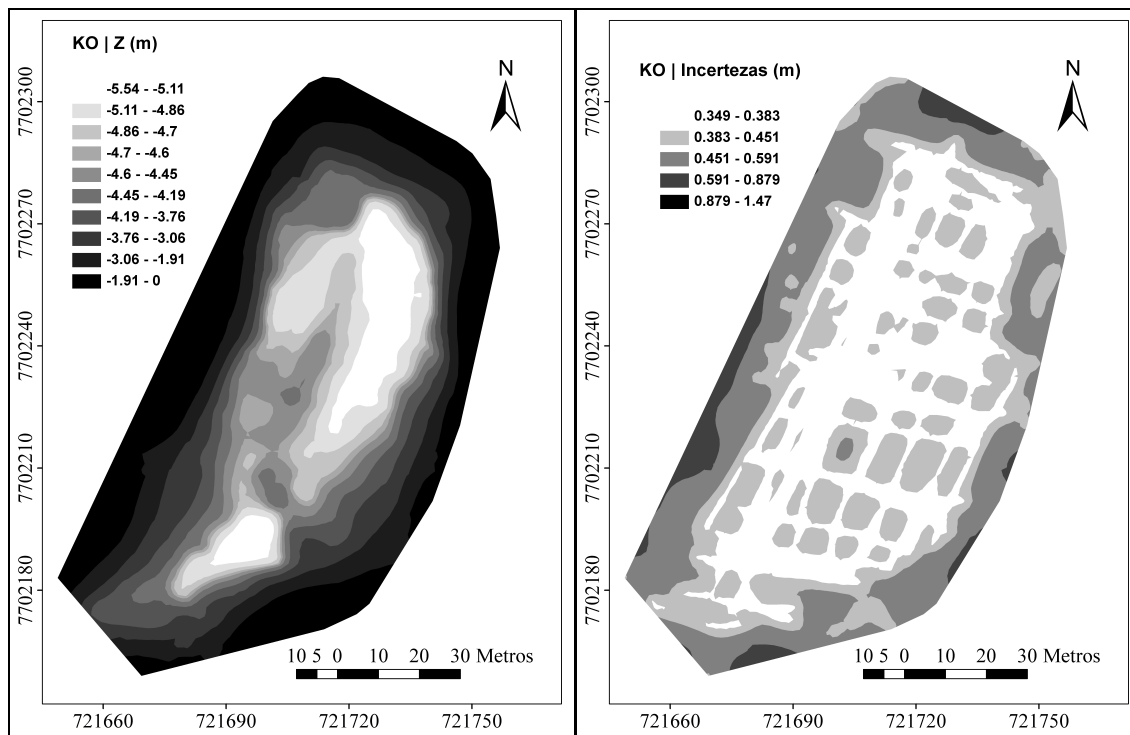
WOLLENHAUPT, N.C.; WOLKOWSKI, R.P. & CLAYTON, M.K. **Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application.** J. Prod. Agric., 7: 441-448. 1994

APÊNDICE A - Histograma da análise das linhas de verificação

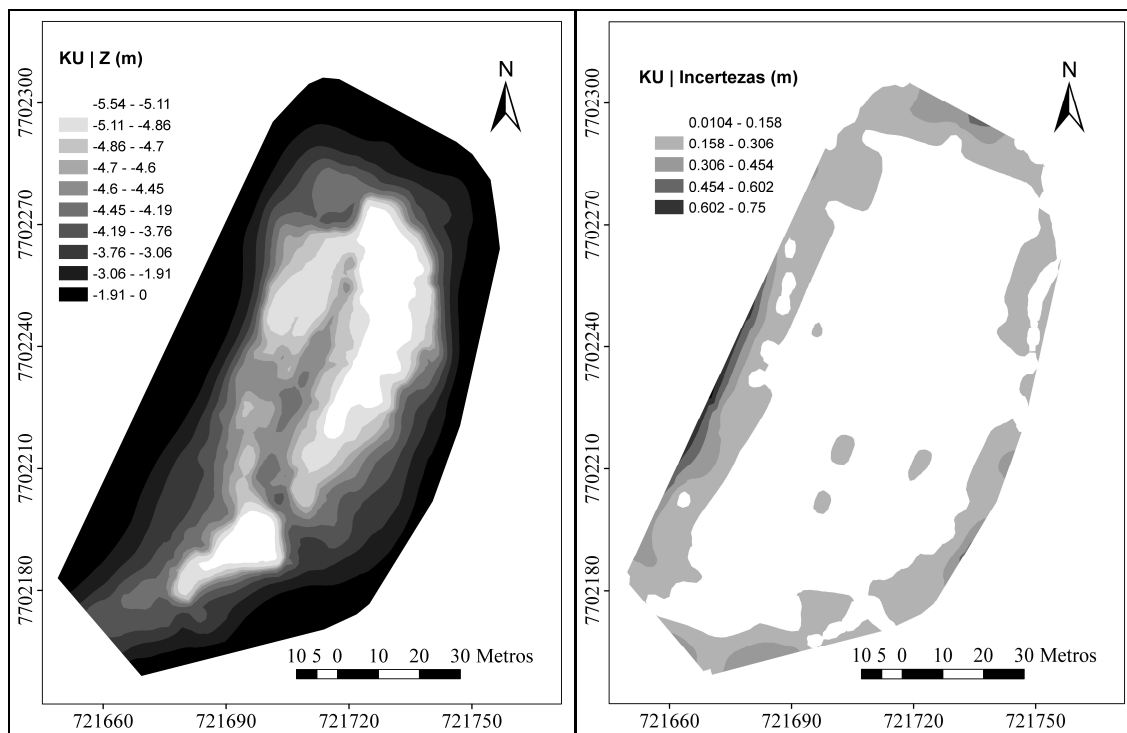


Índices estatísticos das linhas de verificação e histograma das diferenças encontradas nas intersecções entre as linhas regulares de sondagem e as linhas de verificação versus a frequência.

APÊNDICE B – Modelo Digital de Profundidade



MDP e mapa de incertezas construído com base na Krigagem default.



MDP e mapa de incertezas construído com base na Krigagem sistemática.

**ANEXO A – Especificações da IHO para Levantamentos Hidrográficos.
Fonte: Adaptado de IHO, 2008).**

Ordem	Especial	1a	1b	2
Detecção de Feições	Exigido	Exigido	Não Aplicável	Não Aplicável
Máximo Espaçamento entre linha	Não definido - Exigido levantamento completo do fundo	Não definido - Exigido levantamento completo do fundo	3 x profundidade média ou 25 metros, a maior das duas. Para lidar batimétrico utiliza-se um espaçamento de pontos de 5 x 5 metros	4 x profundidade média
Posicionamento bidimensional de auxílios visuais à navegação fixos e topografia relevantes para a navegação. Nível de confiança: 95%	2 metros	2 metros	2 metros	5 metros