

EDILSON JOSÉ DO CARMO

**AVALIAÇÃO DOS INTERPOLADORES KRIGAGEM E TOPO TO RASTER NA
GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO A PARTIR DE DADOS
BATIMÉTRICOS**

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
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Carmo, Edilson José do, 1986-
C287a Avaliação dos interpoladores Krigagem e Topo to Raster na
2014 geração de Modelos Digitais de Elevação a partir de dados
batimétricos / Edilson José do Carmo. – Viçosa, MG, 2014.
xv, 95f : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Dalto Domingos Rodrigues.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 88-95.

1. Ecobatímetro. 2. Mapas batimétricos. 3. Topo to Raster.
4. Krigagem. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia
Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 623.8928

EDILSON JOSÉ DO CARMO

**AVALIAÇÃO DOS INTERPOLADORES KRIGAGEM E TOPO TO RASTER NA
GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO A PARTIR DE DADOS
BATIMÉTRICOS**

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: 25 de novembro de 2014.

Nerilson Terra Santos

Giuliano Sant'Anna Marotta

Dalto Domingos Rodrigues
(Orientador)

A Deus, meus familiares e aos meus amigos
que me incentivaram e ajudaram nos
momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada.

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, aos meus amados pais (Elio Imaculado do Carmo e Eva Aparecida de Laia do Carmo), meu irmão (Edinilson Aurelianno do Carmo) a meu sobrinho (Pedro Henrique).

À toda a minha família.

A minha namorada, Carlota que durante esta caminhada sempre esteve ao meu lado, pela paciência e compreensão em todos os momentos.

Agradeço também a todos os professores que me acompanharam durante a graduação que tive na UFRRJ, em especial aos professores Luiz Guimarães Barbosa, João Gonçalves Bahia e Romulo Gonçalves Parma.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil – Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da UFV, pelos ensinamentos recebidos ao longo do curso de mestrado.

Ao professor Dr. Dalto D. Rodrigues, pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta dissertação.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. Gérson Rodrigues dos Santos por me auxiliar neste estudo sempre que necessitei.

A Universidade Federal de Viçosa pelo mestrado em Engenharia Civil – Informações Espaciais em especial 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, a Geraldo técnico do laboratório por sua prestatividade e Cilene por sempre estar disposta a ajudar nos muitos momentos em que precisei. Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil, pela paciência com que me trataram todo este tempo.

Aos alunos de graduação e de pós-graduação que auxiliaram nos trabalhos de campo: Marcony, Salomão, Eder, Ítalo, Jose Junior, Denis, Sandro.

Aos meus amigos de longas datas, em especial aos da república Alcatraz.

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

A todos, o meu muito obrigado!

“O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”. (Albert Einstein)

Sumário

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Justificativas	4
1.3 Organização da Dissertação	4
2 AVALIAÇÃO DOS INTERPOLADORES KRIGAGEM E TOPO TO RASTER PARA GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO A PARTIR DE UM “AS BUILT” 6	
2.1 Introdução.....	8
2.2 Geoestatística.....	9
2.3 Topo to Raster	11
2.4 Rede de Triângulos Irregulares (TIN)	13
2.5 Materiais e métodos.....	13
2.6 Resultados e discussão	18
2.7 Conclusões e recomendações	23
3 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DE MDEs GERADOS APLICANDO KRIGAGEM A DADOS DE LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO MONOFEIXE	25
3.1 Introdução.....	27
3.2 Análises estatísticas	28
3.3 Materiais e métodos.....	29
3.3.1 Análise exploratória das profundidades medidas.	31
3.3.2 Análise da dependência espacial	32
3.3.3 Auto validação	32
3.3.4 Análise da acurácia dos MDEs	34
3.4 Resultados e discussões.....	36
3.4.1.1 Análise da distribuição espacial dos pontos de referência	40
3.4.1.2 A análise da normalidade da amostra de discrepâncias	42
3.5 Conclusões e recomendações	43

4	AVALIAÇÃO DO USO DE ECOBATÍMETRO NA DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE LAMA EM CAIXAS DE DECANTAÇÃO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	45
4.1	Introdução.....	47
4.2	Introdução ao ecobatímetro	48
4.3	Propagação de ondas sonoras na água.....	49
4.4	Materiais e métodos.....	51
4.5	Resultados e discussão	54
4.6	Conclusões e recomendações	59
5	ANÁLISE DA QUALIDADE DA REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE SUPERFÍCIES BATIMÉTRICAS UTILIZANDO OS INTERPOLADORES KRIGAGEM E TOPO TO RASTER VARIANDO O ESPAÇAMENTO ENTRE AS SEÇÕES.....	61
5.1	Introdução.....	62
5.2	Interpoladores	64
5.3	Planejamentos das seções ou linhas regulares de sondagem em levantamentos batimétricos	66
5.4	Materiais e métodos.....	70
5.5	Resultados	75
5.6	Conclusão	84
6	CONCLUSÕES GERAIS.....	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Semivariograma e seus parâmetros. Fonte: Adaptado de Burrough e Mcdonnel (1998).	11
Figura 2.2 – Modelo 3D da caixa de decantação.....	14
Figura 2.3 – Localização dos Pontos Amostrados.....	15
Figura 2.4 – MDE gerado pelo TIN.	19
Figura 2.5 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado às semivariâncias estimadas.	19
Figura 2.6 – MDEs gerados pela krigagem ordinária (Figura 2.6-a) e pela krigagem simples (Figura 2.6-b).....	20
Figura 2.7 – Na cor preta, isobatimétricas geradas pelo método TIN e em vermelho, isobatimétricas geradas pela krigagem ordinária (Figura 2.7-a) e pela krigagem simples (Figura 2.7-b).....	20
Figura 2.8 - MDEs gerados pelo topo to raster padrão (Figura 2.8-a) e pelo topo to raster condicionado (Figura 2.8-b).	21
Figura 2.9 – Na cor preta, isobatimétricas geradas pelo método TIN, e em vermelho, pelo Topo to raster padrão (Figura 2.9-a) e pelo Topo to raster condicionado (Figura 2.9-b).....	21
Figura 3.1 – Modelo 3D da caixa de decantação.....	30
Figura 3.2 – Suporte para adaptar o transdutor e prisma (Figura 3.2-a). Demais equipamentos (baterias e computador) na Figura 3.2-b.....	31
Figura 3.3 – Gráfico de tendência para a frequência de 33 k Hhz (Figura 3.4-a). Gráfico de tendência para a frequência de 210 Khz (Figura 3.4-b).	38
Figura 3.4 – Semivariograma experimental da frequência 33 Khz do levantamento batimétrico.	38
Figura 3.5 – Semivariograma experimental da frequência 210 Khz do levantamento batimétrico.	39
Figura 3.6 – MDE da frequência 210 kHz (Figura 3.7-a) e MDE da frequência 33 kHz (Figura 3.7-b).	39
Figura 3.8 – Histograma das discrepâncias para o MDE da frequência 210 kHz (Figura 3.8-a) e histograma para a frequência 33 kHz (Figura 3.8-b).....	42
Figura 4.1 – Feixe acústico do monofeixe. Fonte: manual hydrobox, 2006.	49
Figura 4.2 – Projeção do feixe.....	50

Figura 4.3 – Modelo 3D da caixa de decantação.....	52
Figura 4.4 – Suporte para adaptar o transdutor e prisma (Figura 4.4-a). Demais equipamentos (baterias e computador) na Figura 4.4-b.....	53
Figura 4.5 – Gráfico de tendência do levantamento topográfico.	56
Figura 4.6 – Gráfico de tendência para a frequência de 33 k kHz (Figura 4.6-a) e gráfico de tendência para a frequência de 210 kHz (Figura 4.6-b). Ambos para o Bat. 1.	56
Figura 4.7 – Gráfico de tendência para a frequência de 33 kHz (Figura 4.7-a) e gráfico de tendência para a frequência de 210 kHz (Figura 4.7-b). Ambos para o Bat. 2.	56
Figura 4.8 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado para as observações do levantamento topográfico.	57
Figura 4.9 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado para as observações do levantamento Bat. 1, frequência 33 kHz.....	57
Figura 4.10 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado para as observações do levantamento Bat. 1, frequência 210 kHz.....	58
Figura 4.11 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado para as observações do levantamento Bat. 2, frequência 33 kHz.....	58
Figura 4.12 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado para as observações do levantamento Bat. 2, frequência 210 kHz.....	58
Figura 5.1 – Semivariograma e seus parâmetros. (Fonte: Adaptado de Burrough e McDonnell (1998).	66
Figura 5.2 – Limites das áreas de drenagem das bacias do rio Grande e do São Francisco após a transposição das águas e ilustração do percurso das obras de dragagem após a transposição das águas. Fonte: Adaptado do ATLAS digital das águas de Minas Gerais.	71
Figura 5.3 – Representação gráfica dos GRIDs amostrais das observações provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.....	73
Figura 5.4 – Representação gráfica dos Semivariogramas Experimentais e modelo exponencial ajustado às semivariâncias estimadas para os GRIDs 1, 2, 3, 4 e 5 com espaçamento entre as linhas regulares de sondagem de 20, 40, 80, 160 e 320 metros, respectivamente.	77
Figura 5.5 – MDEs gerados pela krigagem (Figura 5.5-a) e Topo to Raster condicionado (Figura 5.5-b) para o GRID 1 (espaçamento de linhas regulares de sondagem de 20 metros) dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.	78

Figura 5.6 – Isobatimétricas geradas pelo método de krigagem, na cor vermelho (Figura 5.6-a) e pelo Topo to Raster, na cor preto (Figura 5.6-b). Espaçamento de linhas regulares de sondagem de 20 metros, dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.	78
Figura 5.7 – MDEs gerados pela krigagem (Figura 5.7-a) e Topo To Raster (Figura 5.7-b) para o GRID 2 (espaçamento de linhas regulares de sondagem de 40 metros) dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.	79
Figura 5.8 – Isobatimétricas geradas pelo método de krigagem, na cor vermelho (Figura 5.8-a) e pelo Topo to Raster, na cor preto (Figura 5.8-b). Espaçamento de linhas regulares de sondagem de 40 metros, dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.	79
Figura 5.9 – MDEs gerados pela krigagem (Figura 5.9-a) e Topo to Raster (Figura 5.9-b) para o GRID 3 (espaçamento de linhas regulares de sondagem de 80 metros) dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.	79
Figura 5.10 – Isobatimétricas geradas pelo método de krigagem, na cor vermelho (Figura 5.10-a) e pelo Topo to Raster, na cor preto (Figura 5.10-b). Espaçamento de linhas regulares de sondagem de 80 metros, dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.	80
Figura 5.11 – MDEs gerados pela krigagem (Figura 5.11-a) e Topo to Raster (Figura 5.11-b) para o GRID 4 (espaçamento de linhas regulares de sondagem de 160 metros) dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.	80
Figura 5.12 – Isobatimétricas geradas pelo método de krigagem, na cor vermelho (Figura 5.12-a) e pelo Topo to Raster, na cor preto (Figura 5.12-b). Espaçamento de linhas regulares de sondagem de 160 metros, dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.	80
Figura 5.13 – MDEs gerados pela krigagem (Figura 5.13-a) e Topo to Raster (Figura 5.13-b) para o GRID 5 (espaçamento de linhas regulares de sondagem de 320 metros) dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.	81
Figura 5.14 – Isobatimétricas geradas pelo método de krigagem, na cor vermelho (Figura 5.14-a) e pelo Topo to Raster, na cor preto (Figura 5.14-b). Espaçamento de linhas regulares de sondagem de 320 metros, dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Análise exploratória da variável Z (Profundidades).....	18
Tabela 2.2 – Índices estatísticos das discrepâncias.	22
Tabela 2.3 – Estatística inferencial para o teste z.....	23
Tabela 3.1 – Índices da estatística descritiva calculados para análise exploratória das profundidades medidas com o levantamento batimétrico nas frequências 33 kHz e 210 Khz.	37
Tabela 3.2 – Índices estatísticos encontrados na auto validação dos MDEs gerados com dados do levantamento batimétrico nas frequências 33 kHz e 210 Khz.....	40
Tabela 3.3 – Índices empregados na análise do padrão de distribuição espacial do vizinho mais próximo.	41
Tabela 3.4 – Valores do teste de normalidade Shapiro-Wilk para o nível de confiança de 95%.	42
Tabela 3.5 – Índices estatísticos das discrepâncias entre os MDEs, dos dados batimétricos nas frequências 33 kHz e 210 kHz, e os pontos do levantamento topográfico.....	43
Tabela 3.6 – Resultado do teste z, para análise de tendência das amostras de discrepâncias. .	42
Tabela 4.1 – Resultados da análise exploratória das amostras profundidades observadas nos levantamentos topográfico e batimétricos 1 (Bat. 1) e 2 (Bat. 2), antes e depois de limpar a caixa, respectivamente.....	55
Tabela 4.2 – Volumes estimados empregando os MDEs topográfico e batimétricos – Bat. 1 e Bat. 2.....	59
Tabela 5.1 – Distanciamento das linhas regulares de sondagem ou seções transversais segundo Carvalho et al (2000).	69
Tabela 5.2 – Resultados da análise exploratória das diferentes amostras de profundidades medidas com ecobatímetro monofeixe e frequência 210 khz.....	75
Tabela 5.3 – Parâmetros dos semivariogramas experimentais para os GRIDs 1, 2, 3, 4 e 5, considerando os espaçamentos entre as linhas regulares de sondagem de 20, 40, 80, 160 e 320 metros, respectivamente.	77
Tabela 5.4 – Índices para análise estatística das discrepâncias entre profundidades observadas nas linhas de verificação e as previstas pelos interpoladores, para os GRIDs 1, 2, 3, 4 e 5.	82
Tabela 5.5 – Volumes e diferenças de volumes de água da lagoa de Capitólio – MG, encontrados a partir dos interpoladores krigagem e Topo to Raster com linhas regulares de sondagem espaçadas em 20, 40, 80, 160 e 320 metros.	83

RESUMO

CARMO, Edilson José do, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Novembro de 2014. **Avaliação dos interpoladores krigagem e Topo to Raster na geração de Modelos Digitais de Elevação a partir de dados batimétricos.** Orientador: Dalto Domingos Rodrigues. Coorientadores: Gérson Rodrigues dos Santos e Joel Gripp Júnior.

Com a evolução, nos últimos anos, dos métodos de levantamentos batimétricos utilizando sensores acústicos (ecobatímetros) e receptores de sinais transmitidos por satélites de navegação, torna-se possível descrever o relevo submerso com mesmo nível de detalhe com que se descreve o relevo da superfície terrestre. A representação gráfica do relevo submerso se dá a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) gerados por interpoladores que buscam, a partir das medidas realizadas, prever a profundidade em locais não amostrados. Das informações geométricas extraídas de levantamentos batimétricos, o volume de água ou lama líquida presente, por exemplo em um reservatório, é a mais relevante. Este trabalho busca avaliar produtos gerados pelo levantamento batimétrico monofeixe, assim como os métodos de interpolação krigagem e Topo to Raster. As áreas de estudo foram uma caixa de decantação de estação de tratamento de água e um lago da represa de furnas, onde foram realizados levantamentos topográficos, com estação total e levantamentos batimétricos, com ecobatímetro monofeixe que opera nas frequências 33 kHz e 210 kHz. Na caixa de decantação, primeiramente foi realizado levantamento batimétrico (Lbat 1). Em seguida, esvaziou-se e limpou-se a caixa e, antes de enchê-la novamente, foi realizado um levantamento topográfico, (Ltop), com estação total. Logo após o enchimento, com água e sem lama decantada, foi realizado outro levantamento batimétrico (Lbat 2). Para o levantamento no lago da represa de furnas, realizou-se levantamento batimétrico automatizado, ou seja, empregando a tecnologia GNSS para o posicionamento. Primeiramente, com os dados do levantamento topográfico, se avaliou os métodos de interpolação krigagem e Topo to Raster na geração do MDE da caixa de decantação. A conclusão foi que o interpolador Topo to Raster condicionado apresentou notáveis deformações nas bordas e no centro da área de estudo, devendo ser descartado. A próxima etapa do trabalho foi avaliar a acurácia dos MDEs gerados aplicando krigagem nos dados do

levantamento batimétrico monofeixe, Lbat 2, utilizando as frequências de 33 kHz e 210 kHz. De posse dos MDEs foram calculadas as discrepâncias entre informações extraídas deles e os pontos do levantamento topográfico. Os resultados apresentaram uma acurácia em torno de 5 cm, em profundidades médias de 3,21 m, e que, como os levantamentos foram realizados após a limpeza da caixa, com água limpa, não se verificou diferença significativa na acurácia dos MDEs gerados com as profundidades levantadas com as frequências 33 kHz e 210 kHz. Em seguida foram gerados os MDEs pela krigagem para o primeiro levantamento batimétrico, Lbat 1, quando ainda existiam resíduos sólidos resultantes do processo de decantação. Os volumes foram calculados e comparados a fim de avaliar a frequência de 33 kHz do ecobatímetro para determinar o volume de lama na caixa. Após analisar os resultados verificou-se que usando somente o primeiro levantamento batimétrico, com as frequências 33 kHz e 210 kHz, não se detectou 186 m³ de lama, num volume total de 799 m³ de água e lama, e que, com a água limpa, o volume determinado pela batimetria é acurado, apresentando discrepância de 0,63% para a frequência de 210 khz e 0,12% para a frequência de 33 khz. Para o levantamento do lago de furnas foram gerados MDEs pelo método de krigagem e pelo Topo to Raster, variando o espaçamento entre as linhas regulares de sondagem, utilizando linhas de verificação transversais às linhas regulares de sondagem. Através da análise estatística das discrepâncias entre as profundidades estimadas pelos interpoladores e as profundidades observadas nas linhas de verificação do levantamento batimétrico, a krigagem apresentou melhores resultados para espaçamentos de 20 a 80 metros. A diferença entre os volumes determinados para os espaçamentos de 20 a 40 metros foi menor que 2%,. Considerando as isobatimétricas entre os diversos MDEs criados, observa-se que para espaçamentos maiores o interpolador Topo to Raster apresentou feições mais suavizadas quando comparado com os MDEs gerados pela krigagem.

ABSTRACT

CARMO, Edilson José do, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2014. **Avaliação dos interpoladores krigagem e Topo to Raster na geração de Modelos Digitais de Elevação a partir de dados batimétricos.** Adviser: Dalto Domingos Rodrigues. Co-advisers: Gérson Rodrigues dos Santos and Joel Gripp Júnior.

With developments in recent years, methods for bathymetric surveys using acoustic sensors (echo sounders) and signals transmitted by satellite navigation receivers, it becomes possible to describe the submerged same level of detail which is embossed with the surface relief describes terrestrial. A graphical representation of the underwater relief occurs from Digital Elevation Models (DEMs) generated by interpolating seeking, from measurements, predict the depth at unsampled locations. The geometrical information taken from bathymetric surveys, the volume of liquid water or mud present, for example in a reservoir, is the most relevant. This study sought to determine the products generated by single beam bathymetric survey, as well as the methods of kriging interpolation and Topo to Raster. The study areas were a box of decanting of the water treatment plant and a dam lake of Furnas, where surveys were conducted, with total station and bathymetric surveys, with a single beam echo sounder which operates at frequencies 33 kHz and 210 kHz . In the settling box, first bathymetric survey was conducted (Lbat 1). Then be emptied and cleaned the box and before filling it again, surveying, (Ltop) was performed with total station. Immediately after filling, without water and mud decanted, another bathymetric survey (Lbat 2) was performed. To survey the dam lake of Furnas, held automated bathymetric survey, ie, using the GNSS technology for positioning. First, the data from the survey, we evaluated the methods of kriging interpolation and Topo to Raster in the DEM generation of the settling box. The conclusion was that the interpolator Top to Raster conditioning showed remarkable deformations at the edges and in the center of the study area and should be discarded. The next stage of this work was to evaluate the accuracy of DEMs generated by applying kriging on data from single beam bathymetric survey, Lbat 2, using the frequencies of 33 kHz and 210 kHz. Possession of DEMs were calculated discrepancies between information from them and points of surveying. The results showed an accuracy of about 5 cm in mean depths of 3.21 m, and that as the surveys were conducted after cleaning the box, with clean water, there was no significant

difference in the accuracy of DEMs generated with depths raised to the frequencies 33 kHz and 210 kHz. Then the DEMs were generated by kriging for the first bathymetric survey, Lbat 1, when solid waste resulting from the settling process still existed. Volumes were calculated and compared to evaluate the frequency of 33 kHz echo sounder to determine the volume of mud in the box. After analyzing the results, it was found that using only the first bathymetric survey, with the frequencies 33 kHz and 210 kHz, there was detected 186 m³ of sludge, in a total volume of 799 m³ of water and mud which, with the clean water the volume is determined by accurate bathymetry, showing discrepancy of 0.63% for the frequency of 210 kHz and 0.12% for the frequency of 33 kHz. To survey the lake of Furnas DEMs were generated by kriging interpolation method and the Top to Raster, varying the spacing between the regular survey lines using horizontal scan lines to the regular survey lines. Through statistical analysis of the discrepancies between estimated by interpolating depths and depths observed in the scan lines of the bathymetric survey, the kriging showed better results for spacings of 40 and 80 meters. Considering the isobatimétricas between different DEMs created, it is observed that for larger spacings the interpolator to Top Raster presented smoother features when compared to the DEMs generated by kriging.

1 INTRODUÇÃO GERAL

Existe uma grande semelhança entre a superfície submersa e a superfície terrestre com suas cadeias de montanhas e vales; a diferença é que o relevo submerso raramente é visível, da superfície. A representação gráfica, seja do relevo submerso ou não, pode ser realizada em cartas topográficas. Essa semelhança deve ser considerada somente na representação gráfica do relevo. Os procedimentos seguidos no levantamento dos dados são bem diferentes, uma vez que, com a invisibilidade do fundo submerso, os pontos de mudanças de declividade não podem ser facilmente localizados e levantados. Também por isso, é dificultada a repetição de levantamentos em pontos já levantados, e conseqüentemente a obtenção de redundância nas medidas, inviabilizando a aplicação do ajustamento de observações.

No passado, as técnicas utilizadas na coleta de dados apresentavam muitas dificuldades com relação à águas muito profundas, além de demandar muito tempo para levantar uma pequena parte da superfície submersa. Estas dificuldades fizeram com que o mapeamento das superfícies submersas começasse muito mais tarde que o mapeamento da superfície terrestre.

As primeiras medidas de profundidade no oceano foram realizadas em uma expedição científica com um navio britânico (1872-1876), usando fios amarrados na lateral do navio. Nesta expedição foram realizados estudos de corrente do oceano, recolheram-se várias espécimes biológicas e amostras de sedimentos do fundo do oceano (Duxbury e Duxbury, 1991). Este método de medição também foi utilizado em lagos e continuaram sendo realizados até meados de 1920.

Entre 1925 e 1927 foi utilizado o primeiro sonar para localizar recursos subaquáticos, posicionado a bordo de um navio de pesquisa alemão. Os sonares usam ecos do fundo do oceano para medir as profundidades, uma das vantagens deste método é o levantamento de forma contínua (Metzger, 1999).

Com a evolução tecnológica estimulada pela segunda guerra mundial estes equipamentos foram se tornando mais precisos possibilitando atingir cada vez mais, águas mais profundas. Após a segunda guerra mundial os levantamentos continuaram sendo feitos por cientistas, cujas descobertas ajudaram na compreensão das placas tectônicas (Duxbury e Duxbury, 1991).

Coletas de informações submersas são conhecidas como levantamentos hidrográficos. No Brasil eles são regulamentados pela Marinha do Brasil, através da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) que estabelece as normas técnicas referentes às cartas náuticas em

qualquer escala e é também responsável pela produção e manutenção destas cartas, assim como a execução e o controle dos levantamentos hidrográficos (IHO, 2005).

A DHN segue padrões internacionais de qualidade recomendados pela IHO (International Hydrographic Organization), organismo intergovernamental fundado em 1921 por 19 países, incluindo o Brasil. Nos levantamentos hidrográficos o levantamento batimétrico é uma das principais tarefas.

Os levantamentos batimétricos têm por objetivo realizar as medições de profundidades associadas a uma posição planimétrica da embarcação na superfície da água, visando à representação gráfica do relevo submerso com curvas de nível e, atualmente, com o avanço tecnológico, com MDE, permitindo a visualização da topografia submersa (KRUGUER, 2010).

As profundidades podem ser medidas de forma direta com uso de prumo de mão, máquina de sondar e estadias ou de forma indireta, com uso de ecobatímetro monofeixe e multifeixe. Entre estas técnicas, mesmo com a evolução tecnológica, a mais utilizada atualmente em todo o mundo é a que emprega ecobatímetro monofeixe (IHO, 2008; RAMOS, 2010).

Segundo Lekkerkerk (2006) o uso de levantamento aplicando o método direto, por ser moroso e pouco produtivo, deve ser restringido a aplicações em pesquisas de pequeno porte, em águas muito rasas ou em águas onde um ecobatímetro não é prático ou preciso, como por exemplo, áreas com vegetação de fundo densa, que podem causar ecos falsos. Geralmente, o levantamento direto não é utilizado em águas com profundidades superiores a 10 m (dez metros).

A principal diferença entre os ecobatímetros monofeixe e multifeixe está na amostragem das profundidades, sendo que o segundo faz uma varredura completa do fundo, medindo profundidades continuamente; enquanto o primeiro faz medições pontuais, discretas, deixando grande parte da área a ser mapeada sem amostrar.

A posição planimétrica da embarcação, no instante de tomada da profundidade, pode ser determinada empregando diversos métodos, dos quais os mais usados são: estimado, astronômico, visual (ótico), eletrônico e misto. Destes, o método eletrônico é o que é utilizado atualmente, por oferecer melhores precisões.

O método eletrônico consiste em posicionar uma embarcação através de medições de distâncias a partir de estações de apoio em terra ou por meio de sinais de satélites de navegação, como por exemplo, os sistemas de posicionamento global por satélites: GPS, GLONASS, GALILEO.

O método que se emprega medições de distâncias e angulares, visando estações de apoio em terra, para o posicionamento da embarcação, denomina-se de método misto.

Atualmente, o método que tem sido amplamente empregado no posicionamento das embarcações é o método eletrônico utilizando sinais emitidos pelos satélites de navegação. Contudo, a precisão alcançada com o método de posicionamento absoluto ou isolado, não atende as especificações da DHN para levantamentos batimétricos. Então a comunidade recorre aos posicionamentos diferenciais (DGPS -GPS Diferencial ou RTK), os quais consistem no posicionamento de uma estação móvel através das correções geradas na estação de referência.

O resultado final de um levantamento batimétrico monofeixe é uma malha de pontos com coordenadas tridimensionais que são usadas para geração dos MDEs, uma forma de representar matematicamente e graficamente a distribuição da profundidade, com valores de profundidades estimados em locais não amostrados (CAMARGO, 1998).

Para a geração dos MDEs é necessário utilizar interpoladores baseados em métodos de estatística clássica ou Geoestatística (krigagem).

Em trabalhos realizados por Ferreira (2013), foi feita uma 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 e verificou-se que mesmo com poucos dados a krigagem é o melhor estimador linear para locais não amostrados.

A escolha do método de interpolação deve ser feita com cuidado, pois a precisão e a acurácia de cada método dependerá de cada situação. Assim, deve ser feita uma análise criteriosa do método de interpolação a ser usado.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a acurácia de produtos gerados por levantamentos batimétricos com ecobatímetro monofeixe. Para isto subdividiu-se o estudo nos seguintes objetivos específicos:

- Avaliação dos interpoladores krigagem e Topo to Raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de levantamento topográfico;
- Avaliação da acurácia do MDE de levantamento batimétrico monofeixe;
- Avaliação do uso de ecobatímetro na determinação do volume de lama em caixas de decantação de estação de tratamento de água.
- Análise da qualidade da representação computacional de superfícies batimétricas utilizando os interpoladores krigagem e Topo to Raster variando e analisando o espaçamento entre as seções.

1.2 Justificativas

Os levantamentos batimétricos utilizando ecobatímetro monofeixe tiveram um crescimento substancial nas últimas décadas, graças ao avanço tecnológico, fazendo com que se tornasse uma técnica com grande perspectiva de crescimento e investimento. Sendo assim, faz-se necessário avaliar a acurácia dos produtos derivados de tais levantamentos.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação é dividida em seis capítulos, cuja organização é descrita a seguir:

O capítulo 1 apresenta a introdução dos assuntos a serem abordados, envolvendo os objetivos apresentados e as justificativas para o estudo.

No capítulo 2 é apresentado o primeiro artigo denominado “Avaliação dos interpoladores krigagem e Topo to Raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um *As Built*”, submetido ao Boletim de Ciências Geodésicas, classificação B2 para o grupo Engenharia I.

No capítulo 3 é apresentado o segundo artigo denominado “Avaliação da acurácia de MDEs gerados aplicando krigagem a dados de levantamento batimétrico monofeixe”, será submetido à Revista Brasileira de Cartografia, classificação B3 para o grupo Engenharia I.

No capítulo 4 é apresentado o terceiro artigo denominado “Avaliação do uso de ecobatímetro na determinação do volume de lama em caixas de decantação de estação de tratamento de água”, será submetido ao Journal of Hydrologic Engineering, classificação A2 para o grupo Engenharia I.

No capítulo 5 é apresentado o quarto artigo denominado “Análise da qualidade da representação computacional de superfícies batimétricas utilizando os interpoladores

krigagem e Topo to Raster variando o espaçamento entre as seções”, será submetido à Revista Brasileira de Recursos Hídricos, classificação B2 para o grupo Engenharia I.

No capítulo 6 é apresentada uma conclusão geral do estudo.

2 AVALIAÇÃO DOS INTERPOLADORES KRIGAGEM E TOPO TO RASTER PARA GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO A PARTIR DE UM “AS BUILT”

Artigo intitulado “**Avaliação dos interpoladores krigagem e Topo to Raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um As Built**” submetido ao Boletim de Ciências Geodésicas, na versão original em português.

EDILSON JOSÉ DO CARMO¹

DALTO DOMINGOS RODRIGUES¹

GERSON RODRIGUES DOS SANTOS²

¹ Universidade Federal de Viçosa – UFV

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Informações Espaciais

Universidade Federal de Viçosa, Campus de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, S/N,

Campus Universitário – Cep: 36570-900 – Viçosa-MG

²Universidade Federal de Viçosa – UFV

Departamento de Estatística

Universidade Federal de Viçosa, Campus de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, S/N,

Campus Universitário – Cep: 36570-900 – Viçosa-MG

edilson.carmo@ufv.br, dalto@ufv.br, gerson.santos@ufv.br

RESUMO

O presente trabalho objetiva realizar o “as built” de uma caixa de decantação de estação de tratamento de água e avaliar o uso dos métodos de interpolação krigagem e Topo to Raster na geração de Modelo Digital de Elevação (MDE) do fundo de uma caixa de decantação de uma Estação de Tratamento de Água levantado com estação total. Para interpolação com o Topo to Raster foram usadas duas metodologias, uma usando como arquivo de entrada linhas de contorno e pontos cotados, conhecido como Topo to Raster padrão, e outra usando somente

pontos cotados, conhecido como topo to raster condicionado. A interpolação por krigagem foi feita utilizando krigagem ordinária e krigagem simples. Foi utilizado como referência 50 pontos extraídos do MDE gerado pelo método Triangular Irregular Network (TIN). Para cada amostra de discrepância foram calculados indicadores estatísticos. O Modelo gerado por topo to raster condicionado apresentou visíveis distorções nas bordas e no centro da área de estudo, devendo ser descartado. Aplicando o teste z, conclui-se que as médias das discrepâncias dos interpoladores krigagem ordinária e krigagem simples não são significativas à um nível de confiança de 95%, ou seja, não diferem do TIN. Já os interpoladores Topo to Raster padrão e Topo to Raster condicionado apresentam diferenças significativas nas médias. Para profundidades médias de 3,21 m, foram encontrados os seguintes valores para os indicadores estatísticos: discrepância média de 1 cm, discrepância máxima de 10 cm, desvio padrão da amostra de 3 cm e RMS das discrepâncias de 3 cm.

Palavras-chave: Geoestatística, RMS, Caixa de decantação.

ABSTRACT

This work evaluates the use of Kriging and Topo to Raster interpolation methods in the generation of Digital Elevation Model (DEM) from the bottom of a Water Treatment Station decantation box raised with total station. For the Topo to Raster interpolation two methodologies were used, one using contour lines and quoted points as input file, known as standard Topo to Raster, and another using only quoted points, known as conditioned Topo to Raster. The Kriging interpolation was done using ordinary Kriging and simple Kriging. The DEM generated by the Triangular Irregular Network (TIN) was used as reference. From the isobathymetrics extracted from the DEMs, values were extracted from the interpolated variable and discrepancies were calculated regarding the reference. Statistical indicators were calculated for each discrepancy sample. The model generated by the conditioned Topo to Raster presented visible distortions in the study area edges and center, and must be discarded. Applying the z test, it's concluded that Kriging and standard Topo to Raster interpolators, applied in small surfaces interpolations, do not differ. For average depths of 3,21m, the following statistical indicators values were found: average discrepancy of 1cm, maximum discrepancy of 10cm, standard sample deviation of 3cm and RMS discrepancies of 3cm.

Key words: Geostatistics, RMS, Decantation box.

2.1 Introdução

Em uma estação de tratamento de água os decantadores são caixas onde a velocidade da água, após a floculação, sofre uma diminuição para permitir a deposição dos flocos. Geralmente têm formato retangular ou circular. O fundo tem declividade de acordo com a forma de remoção do lodo (manual ou hidráulica).

O sedimento decantado vai sendo acumulado no fundo da caixa ocorrendo um processo de consolidação. O acúmulo de grandes quantidades desses sedimentos, afeta de forma substancial o desempenho da caixa de decantação, criando a necessidade de se realizar limpezas periódicas para a retirada dos resíduos. A fim de determinar o volume de resíduos e identificar o momento certo de realizar a limpeza faz-se necessário conhecer, com precisão, o volume da caixa de decantação.

O levantamento dos dados necessários à realização do “as built” pode ser realizado empregando instrumentos como estação total, laser scanner e, em casos de superfícies submersas, ecobatímetros. Entre estes a estação total é, atualmente, o instrumento mais comumente utilizado.

Após a realização de um levantamento topográfico, o produto primário que se tem é uma lista de coordenadas tridimensionais da qual podem-se extrair diversas informações geométricas, entre elas o volume. Uma vez que a lista de coordenadas é uma amostragem discreta da superfície levantada, para uma melhor avaliação do volume, é necessária a geração de uma superfície contínua denominada Modelo Digital de Elevação (MDE), ou seja, é necessária a utilização de técnicas de interpolação que utilizam modelos matemáticos para estimar a variável em locais não amostrados (CAMARGO, 1998). O interpolador deve ser o mais acurado possível e gerar uma superfície mais próxima da realidade.

Segundo Mesquita (2009), na base das técnicas de interpolação mais frequentemente utilizadas está a primeira lei da Geografia ou Lei de Tobler (1970) que afirma: “Everything is related to everything else, but near things are *more related than distant things*” que para efeitos de aplicação se pode traduzir como “pontos vizinhos no espaço tem valores mais correlacionados que pontos distantes”.

Os interpoladores são divididos em duas categorias: os determinísticos e os estocásticos. Os determinísticos geram superfícies considerando apenas as semelhanças espaciais das amostras através de funções matemáticas e não se preocupam com a variabilidade espacial (BURROUGH e MCDONEEL, 1998). Já os interpoladores estocásticos fazem uso da teoria

da probabilidade, e incorporam critérios estatísticos na determinação do peso atribuído aos pontos amostrais para o cálculo das interpolações (MAZZINI e SCHETTINI, 2009).

Segundo Burrough e Mcdoneel (1998), quando existem dados abundantes, a maioria das técnicas de interpolação produz valores semelhantes e no caso de dados esparsos alguns métodos possuem limitações na representação da variabilidade espacial, porque desconsideram a anisotropia e a continuidade do fenômeno que se quer observar.

O presente trabalho tem como objetivo realizar o “as built” de uma caixa de decantação de estação de tratamento de água e avaliar os métodos de interpolação krigagem e topo to raster, empregados para gerar o Modelo Digital de Elevação (MDE) do fundo da caixa, comparando-os com o modelo gerado pelo método de interpolação TIN (Triangular Irregular Network). Estes métodos de interpolação vêm se destacando cada vez mais, graças ao avanço computacional.

2.2 Geoestatística

A Geoestatística tem sua base conceitual nos estudos desenvolvidos pelo Matemático e Geólogo Georges Matheron no final da década de 50 e início da década de 60, quando se formalizou a teoria das variáveis regionalizadas a partir dos estudos práticos desenvolvidos por Daniel Krige, no cálculo do volume de reservas de ouro nas minas da África do Sul. Nestes estudos, ele não encontrava sentido nas variâncias estimadas, se não levasse em consideração a distância e a direção da amostragem (KAMIMURA et al; 2012).

Na Geoestatística são levadas em consideração características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas, onde deve existir uma dependência espacial, fazendo com que os dados amostrados possam ser usados para a estimação de valores nos lugares em que a variável não seja conhecida (LANDIM, 2000).

A dependência espacial pode ser visualizada a partir de um semivariograma, ou simplesmente variograma. Segundo Santos et al (2011), esta é uma ferramenta fundamental para descrever quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno regionalizado. O estimador do semivariograma é obtido a partir do cálculo das semivariâncias $\hat{\gamma}(\Delta d)$, dadas pela Equação 2.1:

$$\hat{\gamma}(\Delta d) = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{i=1}^N [Z(l_i) - Z(l_i + \Delta d)]^2 \quad (2.1)$$

em que N é o número de pares dos valores $Z(l_i)$ e $Z(l_i + \Delta d)$, separados por uma distância Δd , l_i é a posição no sistema de coordenadas e Z é a profundidade observada. 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 $\hat{\gamma}(\Delta d)$ aumente com a distância (CAMARGO, 1998; FERREIRA, 2012).

Calculando as semivariâncias estimadas para cada Δd , é possível verificar o comportamento espacial da variável Z em estudo, em relação à distância. Este comportamento pode ser visualizado em forma de gráfico ou tabela.

Segundo Schaffrath (2006), numa representação gráfica das semivariâncias, como a mostrada na Figura 2.1, podem ser identificados os seguintes parâmetros:

- **Alcance:** materializa a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- **Patamar:** é o valor da semivariância correspondente ao seu Alcance (A). A partir deste ponto considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, dado que a variação da diferença entre pares de amostras torna-se aproximadamente constante;
- **Efeito Pepita:** representa a interseção da curva com o eixo $\hat{\gamma}(0)$. Em que o resultado ideal é $\hat{\gamma}(0) = 0$. No entanto, para a maioria dos fenômenos estudados existe uma descontinuidade do semivariograma para distâncias menores que a menor distância entre as amostras, então, $\hat{\gamma}(0) \neq 0$. De acordo com Camargo (1998), parte desta descontinuidade pode ser atribuída à imprecisão da medição, mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém desta imprecisão ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.

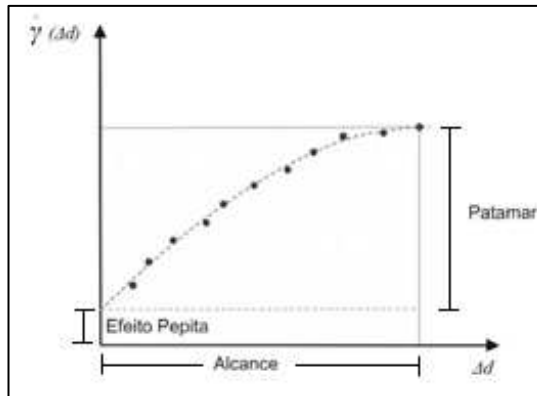


Figura 2.1 – Semivariograma e seus parâmetros. Fonte: Adaptado de Burrough e McDonnel (1998).

Caso exista dependência espacial na variável estudada, pode-se fazer predições em locais não amostrados, por meio de um preditor não tendencioso e de variância mínima, chamado de krigagem (SANTOS et al; 2011). Segundo os mesmos autores os principais tipos de krigagem linear encontrados na literatura são: krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal e krigagem indicativa.

Segundo Soares (2006), a principal diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação está na maneira como os pesos são atribuídos a diferentes amostras, sendo determinados principalmente por uma análise espacial baseada no semivariograma experimental. Além disso, uma grande vantagem da krigagem em relação a outros métodos está na possibilidade de obter uma variância de interpolação.

A variância de interpolação mede a dispersão local dos pontos amostrados a partir da média ponderada dos quadrados das diferenças entre os valores observados e estimados (YAMAMOTO, 1999).

2.3 Topo to Raster

O método topo to raster foi baseada nos trabalhos desenvolvidos por Hutchinson (1988, 1989) em seu programa ANUDEM. O êxito dessa técnica se dá por permitir que, além de arquivos de pontos, podem ser usados outros formatos de arquivos como curvas de nível, delimitações de rios ou lagos, contorno de penhascos e delimitações de bacias, diminuindo, durante o processo de interpolação, os possíveis erros que venham a ser cometidos pelo método.

Segundo Hutchinson (2009) a interpolação dos dados é feita utilizando a soma ponderada dos quadrados dos resíduos a partir dos dados de elevação da superfície

representada pela grade amostral. Isto é melhor descrito com a definição de um modelo estatístico adequado para os dados, onde o valor de $Z_{\text{est}}(l_i)$ de cada posição (x_i, y_i) é dado pela Equação 2.2:

$$Z_{\text{est}}(l_i) = f(x_i, y_i) + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, np \quad , \quad (2.2)$$

em que $Z_{\text{est}}(l_i)$ é o valor estimado da profundidade para o local l_i ; (x_i, y_i) representam o local l_i para o qual é estimada a profundidade, f é uma função desconhecida bivariada de amortização para as localizações horizontais em um grid finito, np é o número de pontos amostrados e ε_i é um resíduo de média zero e desvio padrão ω_i . Assumindo que cada ponto amostral é localizado aleatoriamente entre seu correspondente no grid, o desvio padrão é dado pela Equação 2.3:

$$\omega_i = h \cdot \frac{S_i}{3,464} \quad , \quad (2.3)$$

em que h é o espaçamento do grid e S_i é a inclinação de cada célula do grid. A função f é estimada então pela solução que minimiza Equação 2.4:

$$\sum_{i=1}^{np} [Z_{\text{est}}(l_i) - f(x_i, y_i)/\omega_i]^2 + \lambda \cdot J(f) \quad , \quad (2.4)$$

sendo $J(f)$ uma medida da rugosidade da função f em termos de primeira e segunda derivadas (HUTCHINSON, 1989) e λ é um número positivo denominado parâmetro de suavização que geralmente é escolhido de forma que a soma dos quadrados dos resíduos ponderados na Equação 2.4 seja igual a np .

Essa técnica de interpolação foi criada com o objetivo específico de converter dados vetoriais em modelos hidrológicos de elevação de terrenos exatos. O método se utiliza da eficiência computacional da interpolação local, como ponderação do inverso da distância, sem

perder a continuidade superficial dos métodos globais de interpolação, como krigagem e spline (NOGUEIRA e AMARAL, 2009).

2.4 Rede de Triângulos Irregulares (TIN)

A estrutura TIN utiliza modelo topológico de dados vetoriais, em que as coordenadas planialtimétricas são ligadas por linhas, formando um mosaico de triângulos interconectados de tamanhos variados. A partir das coordenadas planialtimétricas é possível gerar diferentes triangulações. Desta forma, diferentes critérios foram propostos com o objetivo de construir uma triangulação apropriada para interpolações numéricas (CHAVES, 2002).

Segundo Pinto (1994), uma forma de minimizar erros na interpolação é evitar triângulos longos e finos, ou seja, com ângulos agudos. O ideal é que os triângulos sejam o mais equilátero possível. Solução esta encontrada na triangulação de Delaunay que busca maximizar o menor ângulo. Segundo Chaves (2002), essa triangulação é tão equiângula quanto possível, sendo considerada como padrão para a descrição de superfície.

Em regiões onde há pouca variação de declividade da superfície, os pontos amostrados podem ser mais espaçados, enquanto que em áreas de variação mais intensa na declividade o número de pontos amostrados deve ser maior, de forma que a superfície seja representada com fidelidade. Os pontos devem ser escolhidos de modo a captar as mudanças significativas na forma da superfície, tais como mudanças de declividade.

2.5 Materiais e métodos

Os dados utilizados neste trabalho foram levantados em uma caixa de decantação da Estação de Tratamento de Água (ETA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV). A caixa de decantação possui aproximadamente 20 m de diâmetro e profundidade média de 3,21 m. O local foi escolhido por apresentar características favoráveis a uma área experimental. Um modelo 3D da caixa é apresentado na Figura 2.2.

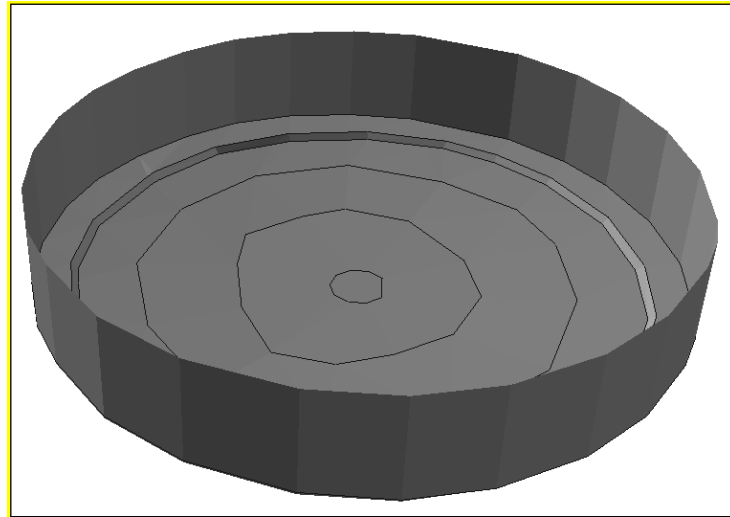


Figura 2.2 – Modelo 3D da caixa de decantação gerado com as observações.

A coleta dos dados foi feita empregando o método irradiação, foram levantados 211 pontos utilizando uma estação total com precisão nominal angular, horizontal e vertical, de 5 segundos e linear de $3 \text{ mm} \pm 3 \text{ ppm}$. O levantamento topográfico da borda e do fundo da caixa d'água foi feito no dia da limpeza, com a caixa vazia, levantando todas as feições de interesse para uma melhor representação do fundo. Este levantamento demandou uma avaliação criteriosa da melhor metodologia de levantamento, para que pudesse ser realizado o mais rápido possível após a limpeza, de forma que não se prejudicasse o abastecimento de água. Devido a este fato, não foram realizadas repetições nas observações, o que levaria a uma melhor estimativa dos valores mais prováveis das coordenadas e suas respectivas precisões. Após a coleta, os dados foram processados em um programa desenvolvido no software MATLAB, gerando um arquivo de pontos com coordenadas planialtimétricas (X, Y, Z), sendo Z a profundidade da caixa de decantação contada a partir da borda superior, conforme Figura 2.3.

As equações empregadas para determinar as coordenadas são:

$$X_i = X_0 + D_{0i} \cdot \sin \hat{Z}_{0i} \cdot \sin HZ_{0i} \quad , \quad (2.5)$$

$$Y_i = Y_0 + D_{0i} \cdot \sin \hat{Z}_{0i} \cdot \cos HZ_{0i} \quad , \quad (2.6)$$

$$Z_i = Z_0 + D_{0i} \cdot \cos \hat{Z}_{0i} \quad , \quad (2.7)$$

sendo:

(X_i, Y_i, Z_i) as coordenadas observadas dos pontos levantados;

(X_0, Y_0, Z_0) as coordenadas arbitradas, e fixas, da estação 0;

D_{0i} a distância inclinada entre a estação 0 e o ponto i ;

\hat{Z}_{0i} o ângulo zenital de 0 para i ;

HZ_{0i} o azimute de 0 para i .

Para as coordenadas X_0 , Y_0 e Z_0 foram atribuídos os valores 1000, 1000 e 0,75 m. O valor de Z_0 foi atribuído tomando a borda da caixa d'água como referência.

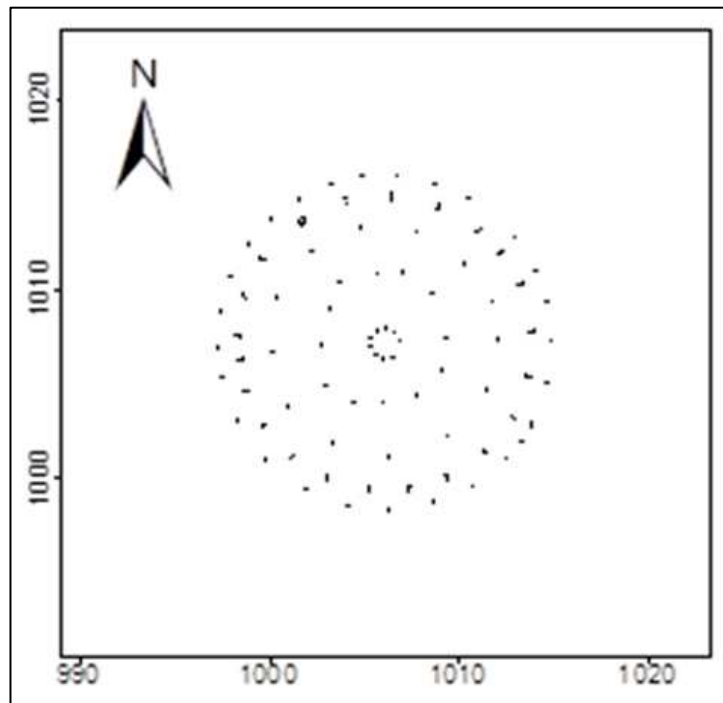


Figura 2.3 – Localização dos Pontos Amostrados.

Como não foi possível a repetitividade das observações, as incertezas nominais do instrumento empregado foram propagadas para as coordenadas determinadas aplicando a lei de propagação das variâncias às equações 2.5, 2.6 e 2.7.

A coordenada Z , usada como variável a ser interpolada, foi submetida a uma análise exploratória.

A análise exploratória de dados nos fornece um extenso repertório de métodos para um estudo detalhado dos dados, antes de utiliza-los.

Além da construção de tabelas e gráficos, a análise exploratória de dados, consiste também de cálculos de medidas estatísticas que resumem as informações obtidas dando uma visão global dos dados.

Com a análise exploratória pôde-se obter a estimativa da média, variância, desvio-padrão, valor máximo, valor mínimo das profundidades medidas além de permitir detectar possíveis outliers (valores que apresentam grande afastamento em relação aos demais, considerados valores “anormais” ou erros grosseiros) (GUIMARÃES, 2004; VILELA, 2004).

Em seguida, empregando o software ArcGis 10, as profundidades foram interpoladas utilizando os métodos krigagem, topo to raster e TIN para a geração dos MDEs.

Na interpolação utilizando krigagem foram gerados dois MDEs: o primeiro aplicando a krigagem ordinária e o segundo aplicando a krigagem simples. A principal diferença entre elas é que, na krigagem simples assume-se a função média do processo estocástica conhecida, já na krigagem ordinária não precisa conhecer esta média (ANDRIOTTI, 1989).

Antes deve ser realizada uma análise geoestatística com o objetivo de modelar a dependência espacial da variável a ser interpolada através do ajuste de modelos teóricos aos semivariogramas experimentais (SANTOS et al; 2011).

Caso seja constatada a presença de dependência espacial entre os dados, pode-se aplicar o método de krigagem para prever a variável em estudo nos locais não amostrados a partir dos dados medidos, de acordo com a Equação 2.8 (CAMARGO, 1998; MESQUITA, 2009).

$$Z_{\text{est}}(l_i) = \sum_{i=1}^{np} p_i \cdot Z_i \quad , \quad (2.8)$$

em que p_i são os pesos associados a cada valor Z_i .

Na interpolação por topo to raster foram gerados dois MDEs: o primeiro aplicando a função aqui denominada “topo to raster padrão”, utilizando como arquivo de entrada pontos e linhas de mudança de declividade, e o segundo, denominado “Topo to Raster condicionado”, utilizando como entrada somente arquivos de pontos. Este segundo processo foi realizado pelo fato de a interpolação por krigagem ser feita somente com pontos e desta forma pode-se analisar os interpoladores nas mesmas condições.

Na interpolação TIN foram utilizados, como dados de entrada, pontos e linhas de

mudança de declividade, buscando uma melhor representação da superfície do fundo da caixa d'água. A utilização deste modelo, como referência, se deu pelo fato de sua característica construtiva utilizar pontos e isolinhas levantados nas mudanças de declividade (CHAVES, 2002).

Após a geração dos MDEs foram extraídas curvas isobatimétricas resultantes da aplicação dos interpoladores. Das isobatimétricas da interpolação TIN foram extraídos 50 pontos para serem usados como referência no cálculo das discrepâncias em relação aos outros métodos conforme Equação 2.9. Essa quantidade de pontos foi escolhida baseada na norma Americana NSSDA, que diz que cerca de 20 pontos distribuídos por toda área é o suficiente. Por motivo de segurança, foram utilizados mais pontos do que é recomendado pela norma, conforme sugere Santos (2010).

O TIN foi utilizado como referência por ser um interpolador exato, esses geralmente são utilizados quando se tem certeza dos valores dos pontos no qual a interpolação está baseada. Eles sempre honram os dados, de maneira que após o processo de interpolação não há presença de resíduos, ou seja, a predição sobre os locais amostrados vai ser igual ao próprio valor amostrado (MAZZINI e SCHETTINI, 2009).

$$d_i = Z_{est}(l_i) - Z_{TIN}(l_i) \quad , \quad (2.9)$$

Para análise estatística das discrepâncias foram calculados os seguintes índices: a média, o desvio padrão e a raiz da média dos quadrados das discrepâncias (RMS_d) empregando as Equações 2.10, 2.11 e 2.12, respectivamente:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{nd} d_i}{nd} \quad , \quad (2.10)$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (d_i - \bar{d})^2}{nd - 1}} \quad , \quad (2.11)$$

$$\text{RMS}_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (d_i)^2}{nd - 1}}, \quad (2.12)$$

sendo:

nd = números de discrepâncias na amostra;

$Z_{\text{TIN}}(l_i)$ = valor da profundidade retirado da isobatimétrica gerada pelo TIN para o local l_i ;

\bar{d} = a média das discrepâncias e

Sd = o desvio padrão da amostra de discrepâncias.

Espera-se amostras de discrepâncias coesas e com média nula. De acordo com Santos, et al (2011), para a krigagem o RMS_d diminui se o modelo adotado para o semivariograma teórico for bem escolhido.

2.6 Resultados e discussão

Os resultados da propagação das incertezas do levantamento topográfico mostraram que as precisões médias para as coordenadas X, Y e Z foram, respectivamente, 0,003; 0,003 e 0,001 metros.

Na análise exploratória da variável Z, a ser interpolada, chegou-se aos resultados da Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Análise exploratória da variável Z (Profundidades).

Média (m)	3,210
Variância (m ²)	0,040
Desvio Padrão (m)	0,206
Profundidade Máxima (m)	3,553
Profundidade Mínima (m)	2,980

Empregando o método boxplot, não foram encontrados “outliers” na amostra, o que poderia afetar o resultado da interpolação.

De acordo com os valores da Tabela 2.1, verifica-se que a profundidade média é de 3,21 m, variância de 0,040 m, desvia padrão de 0,206 m, profundidade máxima de 3,553 m e profundidade mínima de 2,980 m.

O MDE gerado pelo TIN pode ser visto na Figura 2.4.

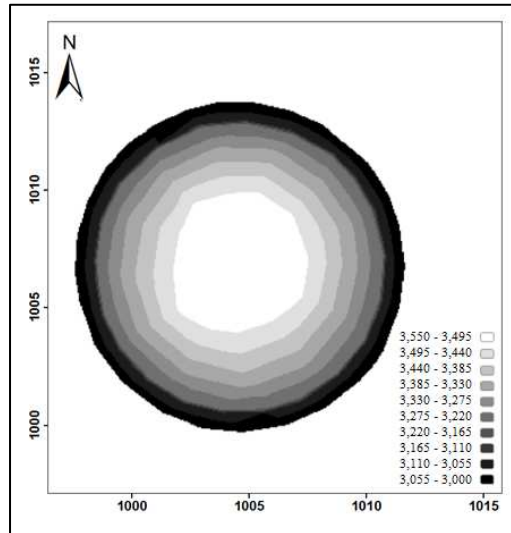


Figura 2.4 – MDE gerado pelo TIN.

Na análise geoestatística, feita a partir do semivariograma experimental, foi detectada a existência de dependência espacial nos dados conforme Figura 2.5. Dos principais modelos teóricos existentes, destacam-se o modelo exponencial, o modelo esférico e o modelo gaussiano (CARVALHO, 2012). Estes modelos foram submetidos em uma análise de auto validação, onde o melhor que se ajustou ao semivariograma experimental foi o gaussiano.

O modelo gaussiano é um modelo transitivo, em que apresenta um crescimento lento da função do variograma, com o comportamento parabólico na origem. É muito utilizado para modelar fenômenos extremamente contínuos e regulares (Isaaks e Srivastava, 1989).

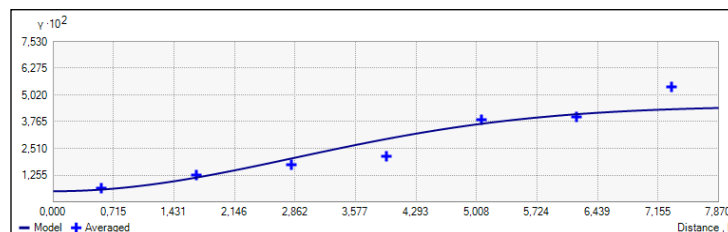


Figura 2.5 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado às semivariâncias estimadas.

Os valores dos parâmetros do semivariograma experimental foram: efeito pepita de 0,005 m; patamar de 0,45 m e alcance de 7 m.

Após a verificação de dependência espacial nos dados aplicou-se a krigagem ordinária e krigagem simples para prever a variável em estudo, coordenada Z, para locais não amostrados conforme sugere Landim et al (2002). Gerando-se então o MDE da krigagem ordinária e o MDE da krigagem simples (Figura 2.6) e suas respectivas isobatimétricas (Figuras 2.7).

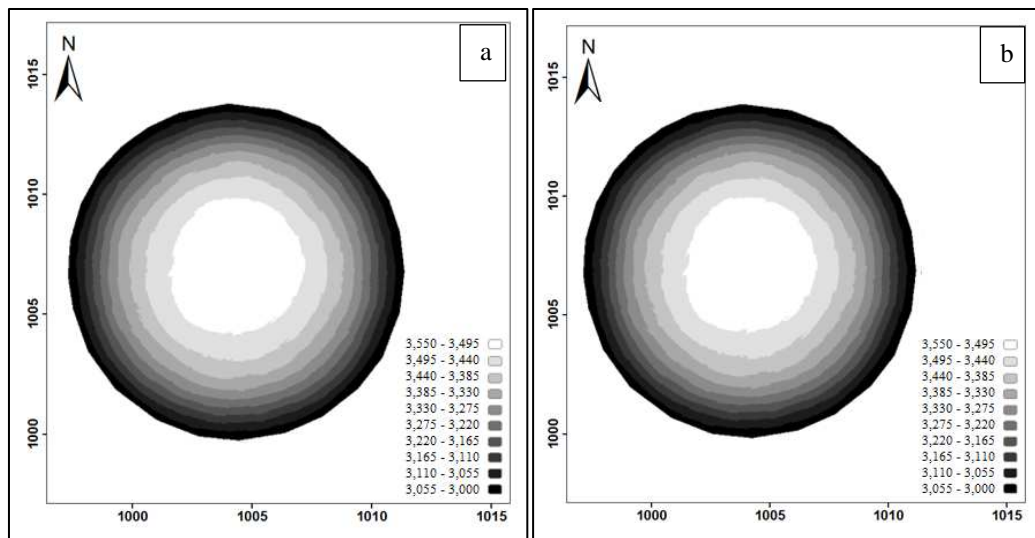


Figura 2.6 – MDEs gerados pela krigagem ordinária (Figura 2.6-a) e pela krigagem simples (Figura 2.6-b).

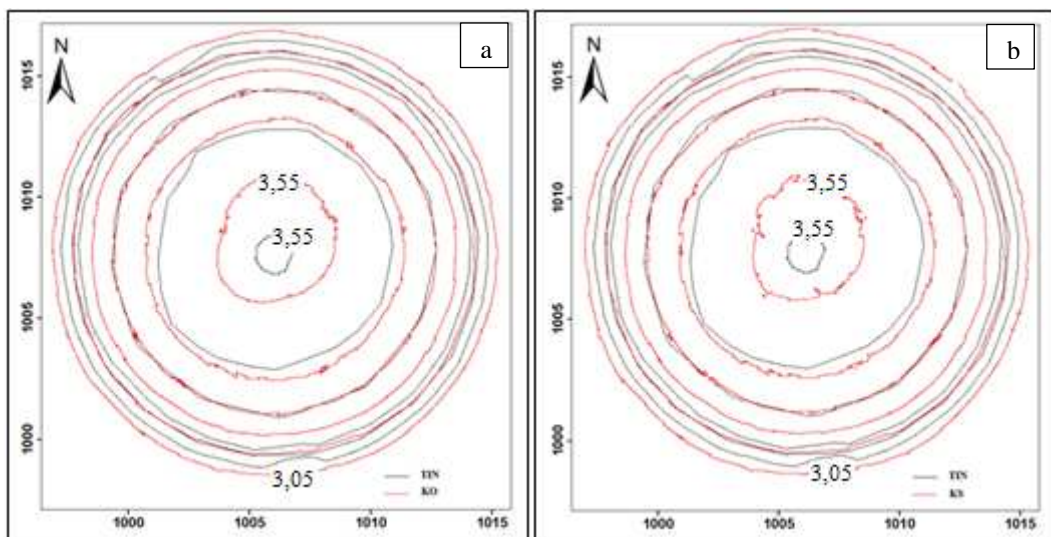


Figura 2.7 – Na cor preta, isobatimétricas geradas pelo método TIN e em vermelho, isobatimétricas geradas pela krigagem ordinária (Figura 2.7-a) e pela krigagem simples (Figura 2.7-b).

Analisando as isobatimétricas na Figura 2.7, verifica-se uma maior diferença entre as isobatimétricas geradas pelos métodos TIN e krigagem, na região central. Observa-se nas Figuras 2.4 e 2.6 que a região central possui uma mesma profundidade.

Os MDEs gerados utilizando topo to raster padrão e topo to raster condicionado são apresentados na Figura 2.8 e suas respectivas isobatimétricas na Figura 2.9.

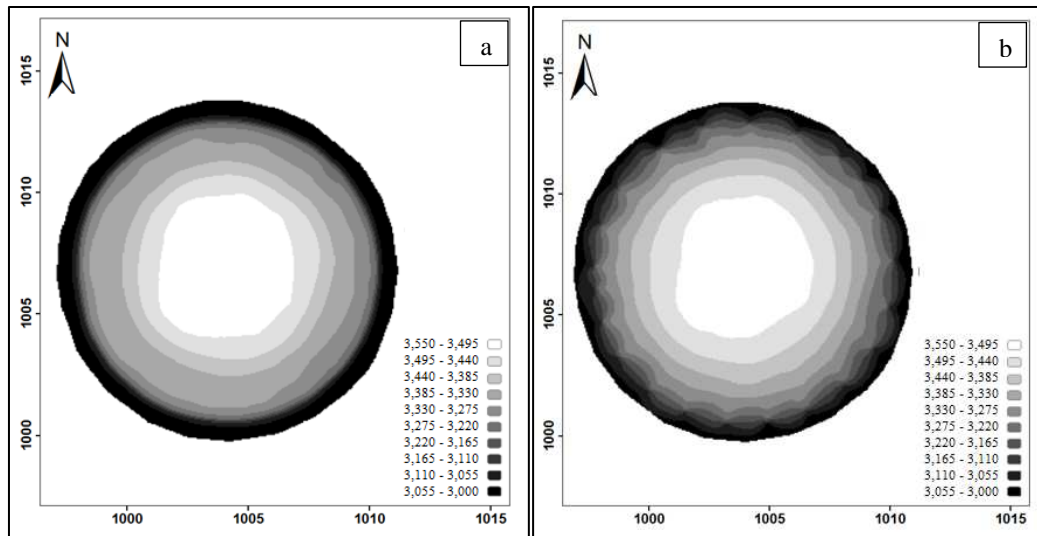


Figura 2.8 - MDEs gerados pelo topo to raster padrão (Figura 2.8-a) e pelo topo to raster condicionado (Figura 2.8-b).

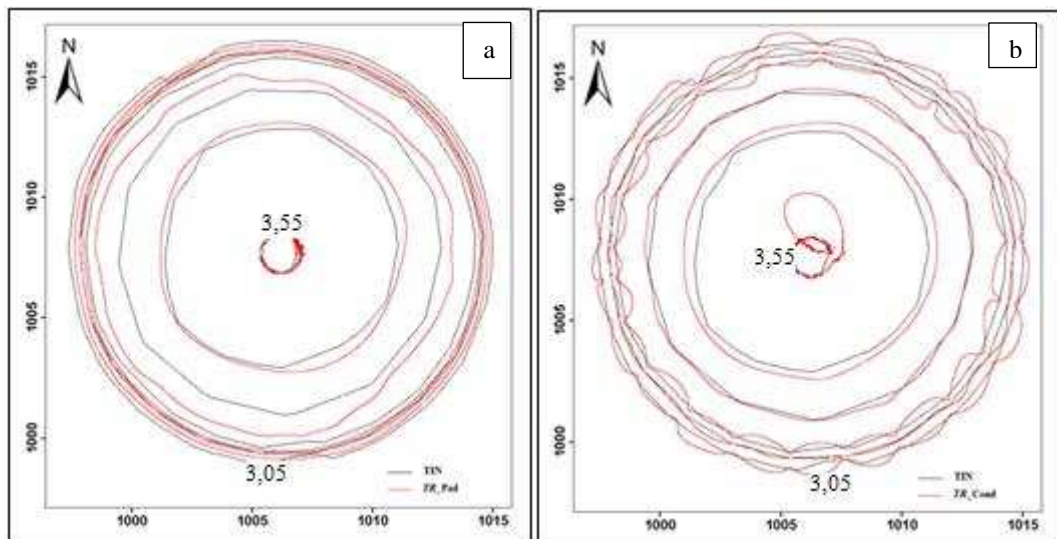


Figura 2.9 – Na cor preta, isobatimétricas geradas pelo método TIN, e em vermelho, pelo Topo to raster padrão (Figura 2.9-a) e pelo Topo to raster condicionado (Figura 2.9-b).

Analisando isobatimétricas na Figura 2.9, verifica-se que a interpolação empregando topo to raster padrão mostrou-se mais realista que topo to raster condicionado, que apresentou irregularidades nas isobatimétricas próxima da borda e do centro. Quando

comparada com a krigagem, Figura 2.7, verifica-se também que as isobatimétricas geradas com o topo to raster foram mais suavizadas. Vale salientar que a interpretação visual das isobatimétricas foi possível pelo fato de o objeto levantado ser uma figura regular construída em concreto liso.

Os índices calculados para a análise estatística das discrepâncias entre os valores das profundidades estimados e encontrados pelo TIN, se encontram na Tabela 2.2 para a krigagem ordinária (KO), krigagem simples (KS), topo to raster padrão (TR_Padrão) e topo to raster condicionado (TR_Cond).

Para profundidades médias de 3,21 m, foram encontrados, com os dois métodos, os seguintes valores para os indicadores estatísticos: discrepância máxima de 10 cm, discrepância média de 1 cm, desvio padrão da amostra de 3 cm e RMS das discrepâncias de 3 cm.

Tabela 2.2 – Índices estatísticos das discrepâncias.

	RMS _d (m)	\bar{d} (m)	Sd (m)	Max (m)	Min (m)
KO	0,032	0,006	0,032	0,088	-0,094
KS	0,032	0,005	0,032	0,086	-0,095
TR_Padrão	0,026	-0,014	0,026	0,103	-0,046
TR_Cond	0,020	0,009	0,020	0,111	-0,089

Ao analisar a Tabela 2.2, verifica-se que entre os métodos krigagem ordinária (KO) e krigagem simples (KS) que os valores encontrados quase não se diferem, o que se verificou também na análise das isobatimétricas. Fato semelhante observa-se na análise com o topo to raster condicionado (TR_Cond) e topo to raster padrão (TR_Padrão), embora, as isobatimétricas geradas com o topo to raster condicionado tenham apresentado irregularidades nas bordas e no centro do reservatório, como mostra a Figura.2.9.

Segundo Andriotti (1986) a krigagem ordinária é mais utilizada que a krigagem simples por não exigir conhecimento da média sobre a área em estudo. Sendo assim assume-se que a krigagem ordinária tenha apresentados resultados mais confiáveis.

Os resultados encontrados para os RMS das discrepâncias, embora um pouco menores para o topo to raster, apresentaram pequenas variações, dificultando a escolha do melhor

método. Sendo assim, optou-se então por aplicar a estatística inferencial na média encontrada, segundo Silveira (2010) e Oliveira et al (2012). Na estatística inferencial a análise é feita através do teste t de Student ou teste z, sendo que o teste t de Student exige que a amostra siga uma distribuição normal ou gaussiana (SANTOS, 2010). Para Montgomery e Runger (2008), a escolha do teste se dá a partir do tamanho da amostra. Para amostras menores que 30 pontos deve se utilizar o teste t e para amostras maiores o teste z.

Como a amostra possui mais de 30 pontos, aplicou-se o teste z, conforme Equação 2.13. Onde, μ é a média esperada, que é zero.

$$z_{cal} = \frac{\bar{d} - \mu}{\frac{Sd}{\sqrt{nd}}} \quad , \quad (2.13)$$

A Tabela 2.3 apresenta os resultados do teste z, mostrando que dentro de um nível de confiança de 95%, a média das discrepâncias dos interpoladores KO e KS não é significativa, ou seja, não diferem do TIN. Já os interpoladores TR_Padrão e TR_Cond apresenta diferença significativa na média quando comparados ao TIN.

Tabela 2.3 – Estatística inferencial para o teste z.

	z_{cal}
KO	1,837 ^{ns}
KS	1,531 ^{ns}
TR_Padrão	5,276*
TR_Cond	4,409*

* significativo; ns não significativo.

Os resultados encontrados corroborarão com o observado por Guedes et al (2011). Este Autor analisou a precisão do interpolador krigagem ordinária e topo to raster na geração de MDE.

2.7 Conclusões e recomendações

Com este estudo pode-se verificar a acurácia dos Modelos Digitais de Elevação de pequenas superfícies, levantadas por topografia, gerados por krigagem ordinária, krigagem simples, topo to raster padrão e topo to raster condicionado comparando-os com o modelo de elevação gerado por Rede de Triângulos Irregulares – TIN.

Para profundidades médias de 3,21 m, foram encontrados os seguintes valores para os indicadores estatísticos: discrepância média de 1 cm, discrepância máxima de 10 cm, desvio padrão da amostra de 3 cm e RMS das discrepâncias de 3 cm.

A partir das isobatimétricas verificou-se que o interpolador topo to raster condicionado, cujos dados de entrada são somente os pontos cotados, apresentou notáveis deformações nas bordas e no centro da área de estudo, devendo ser descartado.

Aplicando o teste z, conclui-se que os interpoladores krigagem e topo to raster padrão, aplicados na interpolação de pequenas superfícies, se diferem do TIN.

Vale salientar que para empregar o topo to raster padrão há necessidade de se fornecer como entrada informações de contorno enquanto para krigagem bastam os pontos cotados.

AGRADECIMENTOS:

Ao Departamento de Engenharia Civil - Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Viçosa – UFV pelo apoio a esta pesquisa.

A Divisão de Água e Esgoto da UFV por colaborar com local de pesquisa.

Ao corpo de bombeiros da UFV por sempre atender aos pedidos solicitados para auxiliar nos trabalhos de campo.

3 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DE MDEs GERADOS APLICANDO KRIGAGEM A DADOS DE LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO MONOFEIXE

Artigo intitulado “**Avaliação da acurácia de MDEs gerados aplicando krigagem a dados de levantamento batimétrico monofeixe**” em fase de conclusão para posterior submissão à Revista Brasileira de Cartografia, na versão original em português.

EDILSON JOSÉ DO CARMO¹

DALTO DOMINGOS RODRIGUES¹

GERSON RODRIGUES DOS SANTOS²

¹ Universidade Federal de Viçosa – UFV

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Informações Espaciais

Universidade Federal de Viçosa, Campus de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, S/N,
Campus Universitário – Cep: 36570-900 – Viçosa-MG

²Universidade Federal de Viçosa – UFV

Departamento de Estatística

Universidade Federal de Viçosa, Campus de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, S/N,
Campus Universitário – Cep: 36570-900 – Viçosa-MG

edilson.carmo@ufv.br, dalto@ufv.br, gerson.santos@ufv.br

RESUMO

O presente trabalho visa avaliar a acurácia de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) resultantes de levantamento batimétrico utilizando ecobatímetro monofeixe que opera nas frequências 33 kHz e 210 kHz. O local de estudo é uma caixa de decantação da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), localizada no município de Viçosa-MG. Foram realizados dois levantamentos: um topográfico, com a caixa vazia, e outro batimétrico, logo após a limpeza da caixa, portanto, com água sem a presença de lama. Na construção dos MDEs, optou-se por utilizar o método de krigagem. Foram avaliadas as krigagens ordinária, simples e universal, com e sem tendência, e a escolha se deu a partir da análise dos parâmetros advindos da auto validação. Para o levantamento

batimétrico o método que apresentou melhores resultados foi a krigagem ordinária com remoção de tendência. Com os MDEs assim gerados, calcularam-se as discrepâncias entre as elevações extraídas deles e as correspondentes, medidas com o levantamento topográfico. Com profundidades média de 3,21m, para a frequência de 33 kHz a discrepância máxima encontrada foi de 13 cm e discrepância média 0,5 cm, o desvio padrão da amostra de discrepância foi de 5 cm e o RMS das discrepâncias foi de 6 cm. Para a frequência de 210 Khz encontrou-se, para estes mesmos índices estatísticos, os seguintes valores, respectivamente: 13 cm, -1 cm, 4 cm e 5 cm.

Palavras-chave: krigagem, Levantamento batimétrico, MDE, acurácia.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the accuracy of Digital Elevation Models (DEMs) resulting from bathymetric survey employing a single beam echobathymeter which operates in the frequencies of 33 kHz and 210 kHz. The study site is a decantation box from the Water Treatment Station (WTS) of the Federal University of Viçosa (FUV), located in the city of Viçosa - MG. Two surveys were made: a topographical one, with the box empty, and a bathymetric one, right after the box cleaning, therefore, with water without mud presence. In the DEMs construction, the Kriging method was chosen. Ordinary, simple and universal Krigings were evaluated, with and without trend, and the choice was made from the deriving parameters of self-validation. For the bathymetric survey, the ordinary Kriging with trend removal method presented the best results. With the DEMs so generated, the discrepancies between the surveys extracted from them and the corresponding ones, measured with the topographical survey, were calculated. With average depths of 3.21m, it was found a maximum discrepancy of 10cm and an average discrepancy of 10cm for the 33kHz frequency. For the standard deviation of the 10cm sample, the RMS_d was 6cm. For the 210 kHz frequency, using the same statistical indices, the following values were found, respectively: 10, 10 and 5cm.

Key words: Kriging, bathymetric survey, MDE, accuracy.

3.1 Introdução

Em levantamentos batimétricos monofeixe, onde existem espaços sem amostragem do fundo submerso, a aplicação de interpoladores é indispensável para a construção de uma superfície contínua. Segundo Camargo (1998), esta é uma forma de representar matematicamente e graficamente a distribuição da profundidade, com valores de profundidades estimados em locais não amostrados.

De acordo com Pettinati (1983), a criação do modelo matemático de uma superfície consiste no agrupamento de amostras (X, Y, Z) que descrevem a superfície real, de maneira que todo o conjunto simule de modo ideal o comportamento da superfície original. A representação desta superfície se dá a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE).

Para a geração de um MDE é necessário utilizar um interpolador que prediz a variável em estudo para locais não amostrados, fazendo com que a variável seja representada de forma contínua (CAMARGO, 1998). Os interpoladores podem ser baseados em métodos de estatística clássica ou Geoestatística (krigagem).

É importante ressaltar que o MDE gerado pelo interpolador, traz incertezas. Segundo Aronoff (1995), considerar essas incertezas, sejam elas na aquisição de novas informações ou em sua conversão, é importante no uso de qualquer dado espacial. Segundo Arbia et al (1998), estas incertezas estão diretamente relacionadas com as discrepâncias entre as grandezas preditas, estimadas, e a realidade.

A partir de análises estatísticas dessas discrepâncias pode-se avaliar a qualidade dos dados espaciais. O conceito de qualidade se refere ao conjunto de características que um produto apresenta, e que traz confiança e satisfação do usuário em relação ao produto (ATKINSON e ARIZA, 2002).

No Brasil, a avaliação de qualidade de dados espaciais é feita a partir do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) definido no Decreto-lei n°. 89.817 de 1984, que regulamenta a classificação dos produtos cartográficos quanto a sua acurácia (SANTOS, 2010). Segundo o mesmo autor outra opção de avaliação para o Brasil seria a Norma Técnica Brasileira de Execução de levantamentos topográficos NBR 13.133, que traz em um dos tópicos a inspeção de trabalhos topográficos com o objetivo de avaliar a acurácia posicional do levantamento.

Neste sentido, este trabalho objetiva avaliar a acurácia de MDEs gerados empregando as medidas de um levantamento batimétrico. Para isso foram realizadas duas amostragens: uma

com o ecobatímetro monofeixe, considerado menos preciso devido a vários fatores que influenciam na propagação da onda acústica no meio aquático e outra utilizando equipamentos da topografia convencional que permitem obter medidas mais precisas.

A partir da amostragem feita pelo levantamento batimétrico foram gerados os MDEs utilizando krigagem. A amostragem feita pelo levantamento topográfico foi utilizada como pontos de referência.

3.2 Análises estatísticas

Segundo Santos (2010), as normas de controle de qualidade posicional utilizam metodologias de avaliação baseadas em pontos de checagem bem definidos e distribuídos espacialmente.

Atualmente, o padrão de distribuição espacial é analisado visualmente, mas o uso de técnicas de estatística espacial pode ser útil para a análise das amostras e verificar se o padrão de distribuição dos pontos é agrupado, disperso ou aleatório (SANTOS, 2010). Entre as técnicas de estatística espacial utilizada para detectar o padrão espacial de distribuição dos pontos Wong e Lee (2005) cita quatro: análise de quadrantes, vizinho mais próximo, função K e a autocorrelação espacial. Mais detalhes destas técnicas podem ser encontrados em Santos (2010).

A análise estatística da qualidade de um produto cartográfico, segundo Galo e Camargo (1994), se fundamenta nos testes de hipóteses sobre a média e o desvio padrão das discrepâncias entre o produto em avaliação e os pontos de referência.

A partir destes índices estatísticos, média e desvio padrão, devem ser feitas análises de tendências, pela estatística inferencial ou pela estatística espacial. Na estatística inferencial a análise é feita através do teste t de Student e teste z, sendo que o teste t Student exige que a amostra siga uma distribuição normal ou gaussiana (SANTOS, 2010). Para Montgomery e Runger (2008), a aplicação de cada teste se dá a partir do tamanho da amostra. Para amostras menores que 30 pontos deve se utilizar o teste t, e para amostras com mais de 30 pontos deve se utilizar o teste z.

Sendo assim, faz se necessário realizar um teste de normalidade na amostra. Segundo Torman et al (2005) e Panosso e Malheiros (2014), existe alguns testes que podem ser usados, tais como:

- Shapiro-Wilk – Teste de fácil aplicação e possui a restrição de ser muito sensível à falta de simetria. É recomendado para pequenas amostras.
- Kolmogorov-Smirnov – Teste usado para grandes conjuntos de dados. São permitidos valores perdidos e recomendado para amostras com mais de 1500 elementos.
- Cramer-von Mises – É um teste não executável sem o uso de softwares. São permitidos valores perdidos e não tem restrições quanto ao tamanho da amostra.
- Anderson-Darlin – Apresenta resultados muito parecidos com os do Cramer-von Mises. São permitidos valores perdidos e não tem restrições quanto ao tamanho da amostra.

Além da média e desvio padrão da amostra de discrepâncias, outros índices tais como, discrepância máxima e raiz da média dos quadrados das discrepâncias (RMS_d), podem ser utilizados para avaliar a qualidade de um dado espacial. O RMS_d é uma medida de acurácia proposta por Gauss, onde expressa o grau de proximidade de uma estimativa com o parâmetro para qual ela foi estimada, incorporando efeitos aleatórios e sistemáticos. Sendo a junção da precisão com a tendência (MONICO, 2009).

Em termos práticos, o RMS_d analisa a precisão externa dos dados, ou seja, a dispersão da amostra em relação à dados mais acurados. Já o desvio padrão da amostra, segundo Paes (2008), avalia a precisão interna dos dados, ou seja, a dispersão deles em torno da média.

3.3 Materiais e métodos

Os dados utilizados neste trabalho foram levantados em uma caixa de decantação da Estação de Tratamento de Água (ETA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV). A caixa de decantação possui aproximadamente 20 m de diâmetro e uma profundidade média de 3,21 m. O local foi escolhido por apresentar características favoráveis a uma área experimental.

Na caixa de decantação citada foram realizados dois levantamentos. O primeiro, foi realizado com uma estação total com precisão nominal angular de 5 segundos e linear de 3 mm \pm 3 ppm. Este levantamento foi realizado em dia de limpeza da caixa d'água, com a caixa vazia, levantando todas as feições de interesse para uma melhor representação do fundo. Foi necessária uma avaliação criteriosa da melhor metodologia para que o levantamento pudesse ser realizado o mais rápido possível, após a limpeza, e que não prejudicasse o abastecimento de água. Devido a este fato, não foram realizadas repetições nas observações, o que levaria a uma melhor estimativa dos valores mais prováveis das coordenadas e suas respectivas

incertezas. Após a coleta, os dados foram processados empregando o software MATLAB, gerando um arquivo de pontos com coordenadas planialtimétricas.

Como não foi possível a repetitividade das observações, as incertezas nominais do instrumento empregado foram propagadas para as coordenadas determinadas, aplicando a lei de propagação das variâncias

Um modelo 3D da caixa, gerado por este levantamento, é apresentado na Figura 3.1.

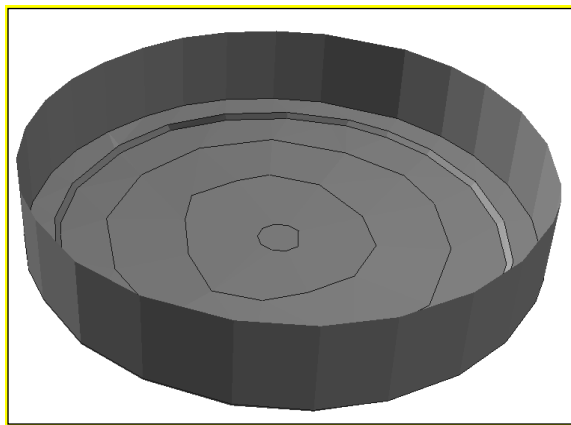


Figura 3.1 – Modelo 3D da caixa de decantação.

Logo após a limpeza, já com a caixa de água cheia, foi realizado o segundo levantamento, com o ecobatímetro Hydrobox da Syqwest Inc., com precisão nominal de 2,5 cm para profundidades variando de 0 a 40m; 5,0 cm para profundidades variando de 40 a 200 m e 10,0 cm para profundidades maiores de 200 m. O ecobatímetro usado opera em duas frequências 33 kHz e 210 kHz e feixes de abertura próximos à vertical. O posicionamento planimétrico das sondagens foi por irradiação, utilizando a estação total empregada no levantamento topográfico acima citado.

Inicialmente foi realizada a calibragem do ecobatímetro utilizando uma chapa metálica (Bar check) fixada a um cabo de aço de 5 m, graduado de 0,5 em 0,5 m. Com a calibração obteve-se, para velocidade de propagação do som na água da caixa, o valor de 1481 m/s. Este valor foi inserido no software Hydrobox Acquisition. A temperatura da água foi observada a cada metro de profundidade durante todo o levantamento, não se verificando alteração, permanecendo o valor constante de 25°C.

Como na área de estudo não foi possível usar uma embarcação, o transdutor juntamente com o prisma refletor foram colocados em um suporte de madeira sobre uma câmara pneumática, conforme Figura 3.2.



Figura 3.2 – Suporte para adaptar o transdutor e prisma (Figura 3.2-a). Demais equipamentos (baterias e computador) na Figura 3.2-b.

Para a movimentação do suporte com o transdutor e o prisma na água utilizou-se uma corda. A utilização deste suporte diminuiu a aglomeração de muitos equipamentos, como computador e baterias, o que poderia comprometer a realização da coleta de dados.

As profundidades devem ser medidas a partir de um nível de redução, quando a cota do nível da água varia ao longo do tempo (IHO, 2008; RAMOS, 2008). Neste trabalho, como não houve variação do nível da água durante o levantamento, o nível de redução foi atribuído como sendo o valor da cota da borda superior da caixa de decantação. Este valor foi usado como referência para o levantamento batimétrico.

Assim como em um levantamento topográfico o resultado primário de um levantamento batimétrico é uma lista de pontos com coordenadas tridimensionais (X, Y, Z). Sendo assim, após a coleta, os dados batimétricos foram processados, gerando dois arquivos de pontos com coordenadas planialtimétricas (X, Y, Z) para o levantamento nas frequências 33 kHz e 210 kHz.

Em seguida, as profundidades e as discrepâncias encontradas foram submetidas a uma série de análises estatísticas.

3.3.1 Análise exploratória das profundidades medidas.

Na análise exploratória por meio da estatística descritiva, foram calculados alguns índices como: profundidade mínima, mediana, profundidade máxima, média, desvio padrão, coeficiente de assimetria e curtose.

3.3.2 Análise geoestatística

Após a análise exploratória, deve ser realizada a análise geoestatística, que é indispensável para a utilização do método de krigagem. Esta análise tem como objetivo verificar a existência de tendência, além de quantificar o grau de dependência espacial da variável a ser interpolada, através do ajuste de modelos teóricos aos semivariogramas experimentais (SANTOS, 2011).

Caso seja detectada tendência nos dados, deve-se remover a tendência a partir de um ajuste de polinômios de baixo grau e o modelo do semivariograma experimental é gerado a partir dos valores não tendenciosos. Nesta situação, Landim (2002), recomenda utilizar a chamada krigagem com tendência, e o MDE final é o resultado do MDE dos valores não tendenciosos adicionado ao MDE com tendência.

Desta forma, sabendo-se da tendência nas observações, devido ao prévio conhecimento da área em estudo, foram avaliados os métodos de krigagem ordinária, krigagem simples e krigagem universal, com tendência e removendo tendência.

3.3.3 Auto validação

Segundo Santos (2010) a auto validação é o procedimento de quantificação de incertezas inerentes ao processo de estimação. Este procedimento faz com que cada ponto medido “deixe de existir” (simulando um ponto perdido ou não observado) no processo de estimação. Dessa forma, tem-se dois conjuntos de dados, os medidos e os preditos (estimados). Assim para cada um dos n locais, com o valor observado Z_{iobs} , há um valor estimado $Z_{est}(l_i)$, em que pode-se estimar uma regressão linear entre eles.

Essa regressão e outros parâmetros de análise, permitem discernir a qualidade da predição, conforme sugere Vieira et al (1983) e Faraco et al (2008). Tais parâmetros são resumidos a seguir, por uma adaptação de Santos (2010).

- Equação de regressão entre os valores estimados, $Z_{est}(l_i)$, empregando o modelo e os valores observados extraídos da amostra Z_{iobs} .

$$Z_{est}(l_i) = a + b \cdot Z_{iobs} \quad , \quad (3.4)$$

em que:

a é o intercepto, que idealmente deve ser zero, porém, para $a > 0$ é provável que esteja ocorrendo uma superestimação e para $a < 0$, esteja ocorrendo uma subestimação;

b é o coeficiente angular da reta que idealmente deve ser 1.

- Discrepâncias entre os n valores estimados, $Z_{est}(l_i)$, e observados Z_{iobs} .

$$d_i = Z_{est}(l_i) - Z_{iobs} \quad (3.5)$$

- Média das discrepâncias da auto validação.

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{nd} d_i}{nd} \quad , \quad (3.6)$$

- Desvio padrão da auto validação. Valores menores são melhores, pois indicam a dispersão em torno da média.

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (d_i - \bar{d})^2}{nd - 1}} \quad , \quad (3.7)$$

- RMS_d (Raiz da média dos quadrados das discrepâncias) da auto validação. Valores menores são melhores, pois indicam que os valores estimados pela interpolação estão mais próximos dos valores medidos em campo, conforme equação 3.5.

$$\text{RMS}_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (d_i)^2}{nd - 1}} \quad , \quad (3.8)$$

Após o ajuste do semivariograma experimental e análise dos parâmetros da auto validação, interpolaram-se os dados para locais não amostrados no levantamento batimétrico realizado com as frequências 33 kHz e 210 kHz, gerando-se os MDEs empregando-se a krigagem ordinária com remoção de tendência.

3.3.4 Análise da acurácia dos MDEs

No processo de avaliação da qualidade dos MDEs gerados foram utilizados como parâmetros de referência noventa e seis pontos advindos do levantamento topográfico. Para avaliação, os pontos de referência utilizados devem ser bem definidos e distribuídos espacialmente. Caso os pontos estejam agrupados em uma determinada região na área de estudo, a avaliação da acurácia não deve ser estendida para toda a área.

Sendo assim, fez-se uma análise do padrão de distribuição espacial dos pontos de referência, utilizando o vizinho mais próximo.

Este método compara a distância média entre os vizinhos mais próximos com um conjunto de pontos que tem um padrão definido teoricamente (SANTOS, 2009). Segundo o mesmo autor devem-se seguir os seguintes passos:

- Obter as distâncias de um ponto i a seu vizinho mais próximo (dv_i);
- Obter a média observada da distância do vizinho mais próximo (menor distância) de cada ponto, conforme Equação;

$$r_{\text{obs}} = \frac{\sum_{i=1}^{nd} dv_i}{nd} \quad , \quad (3.9)$$

- Obter média esperada para uma distribuição aleatória dos pontos, onde A é a área de estudo;

$$r_{\text{esp}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{A}{nd}} \quad , \quad (3.10)$$

- Calcular o índice R, obtido pela razão da média observada da distância ao vizinho mais próximo com a média esperada para uma distribuição aleatória dos pontos, conforme Equação 3.11. Se (R=1) a amostra segue o padrão de distribuição aleatório; se (R<1) a amostra segue o padrão de distribuição agrupado e se (R>1) a amostra segue o padrão de distribuição disperso.

$$R = \frac{r_{\text{obs}}}{r_{\text{esp}}} \quad , \quad (3.11)$$

Para verificar se o índice R é estatisticamente igual ao valor de distribuição aleatório, aplica-se, teste de hipótese (SANTOS, 2010).

Após essa etapa, calculou-se, para cada ponto de referência, a discrepância d_i , que é a diferença entre a profundidade extraída do MDE e a profundidade de referência medida com estação total, na mesma posição planimétrica, conforme Equação 3.12.

$$d_i = Z_{i(\text{bat})} - Z_{i(\text{top})} \quad , \quad (3.12)$$

sendo $Z_{i(\text{bat})}$ o valor estimado para a profundidade na posição i, extraído do MDE; $Z_{i(\text{top})}$ o valor observado para a profundidade na posição i, com o levantamento topográfico.

De posse das amostras de discrepâncias, realizaram-se as seguintes análises estatísticas: análise de normalidade, análise de tendência e análise da acurácia.

A análise de tendência, segundo Santos (2010), pode ser feita pela estatística inferencial ou pela estatística espacial. Na estatística inferencial a análise é feita através do teste t de Student e teste z, sendo que o teste t Student exige que a amostra siga uma distribuição normal ou gaussiana.

O valor de z calculado é encontrado a partir da Equação 3.13. Onde, μ é a média esperada, que é zero. O teste z é aplicado para amostras maiores que 30 pontos.

$$z_{cal} = \frac{\bar{d} - \mu}{\frac{Sd}{\sqrt{nd}}}, \quad (3.13)$$

onde: \bar{d} é a discrepância média; nd é o número de discrepâncias na amostra e Sd é o desvio padrão das discrepâncias.

Sendo assim, faz se necessário realizar um teste de normalidade na amostra. Entre os testes mencionados por Torman et al (2005); Panosso e Malheiros (2010), o mais utilizado é o teste de Shapiro-Wilk.

O teste de normalidade mostra se os dados apresentam uma distribuição normal. A probabilidade (p-valor) que descreve a hipótese da normalidade varia de 0 a 1, sendo que para p-valor $< \alpha$ os dados não apresentam distribuição normal e p-valor $> \alpha$ os dados apresentam distribuição normal. Sendo $\alpha = 0,05$ de probabilidade.

A partir dos índices estatísticos como média das discrepâncias, discrepância máxima, desvio padrão das discrepâncias (Sd) e raiz da média dos quadrados das discrepâncias (RMS_d), calculados pelas equações 3.6, 3.7 e 3.8 avaliou-se a acurácia dos MDEs.

3.4 Resultados e discussões

3.4.1 Análise exploratória das profundidades observadas

As estatísticas descritivas das profundidades medidas com o levantamento batimétrico nas frequências 33 kHz e 210 khz encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Estatísticas descritivas das profundidades medidas com o levantamento batimétrico nas frequências 33 kHz e 210 Khz.

Freq	Min (m)	Média (m)	Mediana (m)	Máx (m)	Sd (m)	Ca	Cc
33 (kHz)	2,98	3,27	3,29	3,65	0,23	-0,03	1,44
210 (kHz)	2,98	3,30	3,33	3,60	0,23	0,05	1,38

Ca= Coeficiente de assimetria; Cc= Coeficiente de curtose.

Percebe-se, através da Tabela 3.1, que para a frequência 210 kHz a média das profundidades é 3 cm maior, a mediana 4 cm maior e a profundidade máxima 5 cm menor. Vale lembrar que a precisão nominal do ecobatímetro é de 2,5 cm e que a água estava isenta de lama.

A amostra da frequência 33 kHz apresenta coeficiente de assimetria negativo baixo. Numa distribuição assimétrica negativa os desvios negativos são preponderantes em relação aos positivos. Já a amostra da frequência 210 kHz apresenta coeficiente de assimetria positivo baixo. Considerando que são simétricas as amostras com $|Ca| < 0,15$; moderadamente assimétricas com $0,15 \leq |Ca| < 1$ e fortemente assimétricas com $|Ca| \geq 1$. Pode-se dizer que as amostras são simétricas.

O coeficiente de curtose é referente achatamento da distribuição, frequentemente estabelecida em relação à distribuição normal.

As profundidades do levantamento batimétrico foram submetidas a uma análise de outliers, onde se verificou que não houve presença de outlier na amostra.

3.4.2 Análise geoestatística

Na análise geoestatística do levantamento batimétrico verificou-se que as profundidades da caixa d'água apresentam tendência espacial de segunda ordem, para as frequências 33 kHz e 210 Khz, como mostra a Figura 3.3.

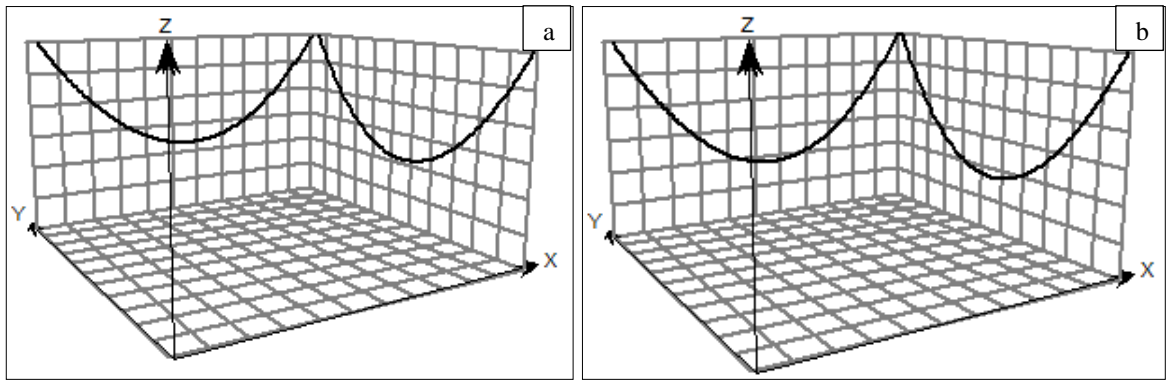


Figura 3.3 – Gráfico de tendência para a frequência de 33 k Hhz (Figura 3.4-a).

Gráfico de tendência para a frequência de 210 KHz (Figura 3.4-b).

Após verificar a tendência espacial das profundidades, deu-se continuidade com a krigagem com remoção de tendência e modelou-se os semivariogramas experimentais das frequências 33 kHz e 210 kHz, a partir dos valores não tendenciosos.

O modelo teórico que melhor se ajustou ao semivariograma experimental na modelagem da dependência espacial foi o gaussiano. O modelo gaussiano é um modelo transitivo, em que apresenta um crescimento lento da função do variograma, com o comportamento parabólico na origem. É muito utilizado para modelar fenômenos extremamente contínuos e regulares (Isaaks e Srivastava, 1989). Os modelos ajustados para as frequências 33 kHz e 210 kHz, podem ser vistos nas Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente. Vale ressaltar que os semivariogramas apresentados, correspondem aos semivariogramas dos valores não tendenciosos.

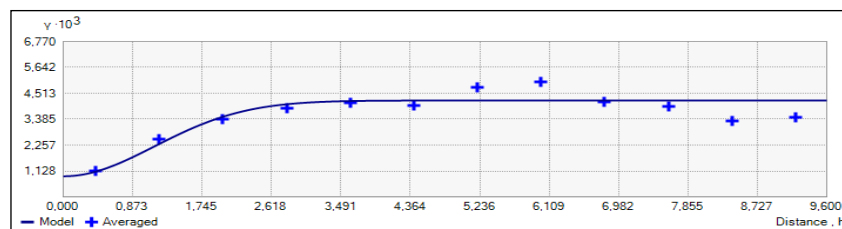


Figura 3.4 – Semivariograma experimental da frequência 33 KHz do levantamento batimétrico.

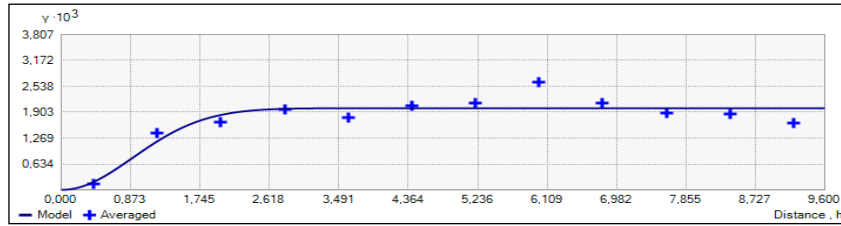


Figura 3.5 – Semivariograma experimental da frequência 210 Khz do levantamento batimétrico.

A Figuras 3.6 mostra os MDEs gerados aplicando a krigagem ordinária, com remoção de tendência, nos dados do levantamento batimétrico com as frequências de 33 kHz e 210 kHz. Nela vê-se também as posições dos pontos levantados com estação total e utilizados como pontos de referência no cálculo das discrepâncias.

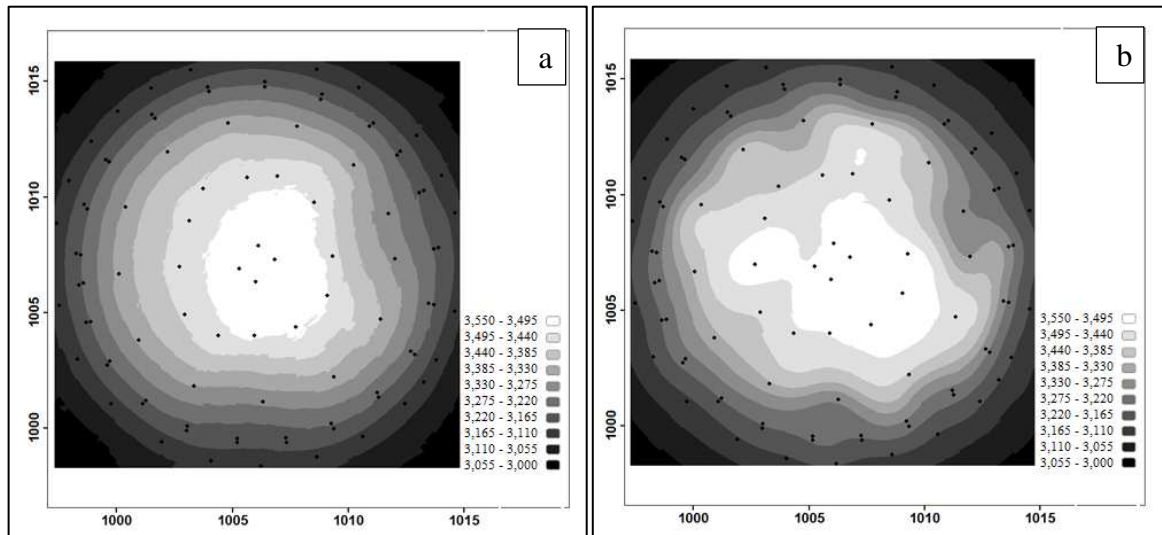


Figura 3.6 – MDE da frequência 210 kHz (Figura 3.7-a) e MDE da frequência 33 kHz (Figura 3.7-b) e pontos levantados por topografia.

3.4.3 – Auto validação

O critério de escolha da krigagem a ser utilizada foi pelo resultado apresentado nos parâmetros da auto validação, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Índices estatísticos encontrados na auto validação dos MDEs gerados com dados do levantamento batimétrico nas frequências 33 kHz e 210 Khz.

Freq		a	b	Média (m)	Sd (m)	RMS _d (m)
33 (kHz)	KO	0,93	7,03	0,00	0,06	0,06
	KS	0,93	7,05	0,00	0,06	0,06
	KU	0,95	4,04	0,01	0,11	0,11
210 (kHz)	KO	0,95	4,80	0,00	0,04	0,04
	KS	0,95	4,89	0,00	0,04	0,04
	KU	1,01	0,71	0,01	0,06	0,06

KO = krigagem Ordinária ; KS krigagem Simples= ; KU = krigagem Universal.

Considerando a ordem de importância da direita para a esquerda, verifica-se na Tabela 3.2 que os parâmetros da auto validação para a krigagem ordinária, apresentou resultados melhores.

3.4.4 Análise da Acurácia dos MDEs

A seguir são apresentados os valores da análise do padrão de distribuição espacial dos pontos de referência, utilizando o vizinho mais próximo; análise da normalidade da amostra de discrepâncias; análise de tendência das amostras de discrepâncias e por fim análise da acurácia.

3.4.1.1 Análise da distribuição espacial dos pontos de referência

Inicialmente, os pontos do levantamento topográfico foram submetidos a uma análise do padrão de distribuição espacial, utilizando o vizinho mais próximo, conforme apresentado na Tabela 3.3. Nesta Tabela, r_{obs} é a média observada da menor distância de cada ponto ao seu vizinho mais próximo; r_{esp} a média esperada dos vizinhos mais próximos para a distribuição aleatória; R a razão entre r_{obs} e r_{esp} ; Z_{cal} é o valor do teste z calculado e Z_{tab} é o valor do teste z tabelado.

Tabela 3.3 – Índices empregados na análise do padrão de distribuição espacial do vizinho mais próximo.

Itens	1º ordem
Área (m ²)	243,4
r _{obs}	0,86799
r _{esp}	0,79615
R	1,09024
z _{cal}	1,69186
z _{tab}	1,96

O termo 1º ordem refere-se à primeira menor distância entre os pontos. Segundo Santos (2010), existem variações deste método, como a segunda ordem ou altas ordens do vizinho mais próximo, em que, é utilizada a segunda menor distância e assim sucessivamente para as outras ordens.

Verifica-se na Tabela 3.3 para a primeira ordem, o z_{calc} foi menor que o z_{tab} , para um nível de significância de 5%, e o índice R é maior que 1. Sendo assim, o padrão de distribuição dos pontos é disperso. Inferindo estatisticamente através do teste Z se o índice R é igual ao valor de distribuição aleatório a hipótese H₀: distribuição dos pontos segue um padrão aleatório é aceita.

3.4.1.2 Análise da normalidade da amostra de discrepâncias

Os valores dos índices calculados para a análise de normalidade, empregando o teste Shapiro-Wilk, W_{cal} , a estatística Shapiro-Wilk e P-Valor, são apresentados na Tabela 3.5. Nela se observa uma distribuição normal para as discrepâncias em ambos MDEs para frequência 33 kHz e 210 kHz. Outro sim desta afirmação é confirmada pelos histogramas apresentados na Figura 3.7.

Segundo Copas e Eguchi (2001), se a distribuição não é normal, a média aritmética é muito influenciada por valores extremos, tornando-se uma medida de tendência central não representativa do conjunto de dados.

Tabela 3.4 – Valores do teste de normalidade Shapiro-Wilk para o nível de confiança de 95%.

Freq (Khz)	Wcal	P-Valor	Teste (P-Valor < 0,05)	Resultado
210	0,9855	0,3729	Não	É normal
33	0,9847	0,3311	Não	É normal

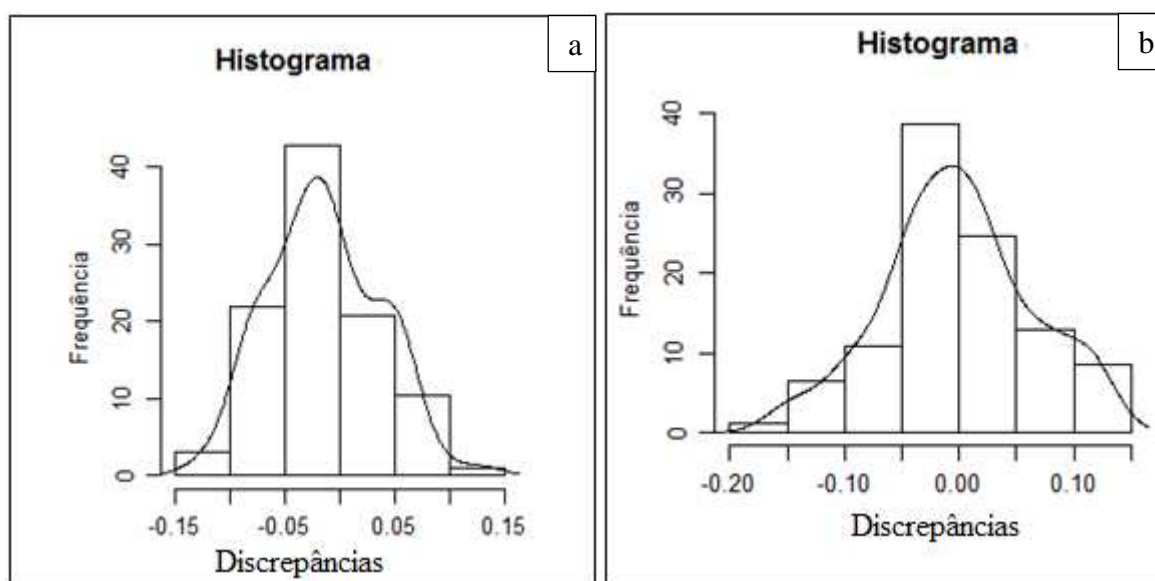


Figura 3.7 – Histograma das discrepâncias para o MDE da frequência 210 kHz (Figura 3.7-a) e histograma para a frequência 33 kHz (Figura 3.7-b).

Os resultados do teste z, aplicando a Equação 3.13 para análise de tendência das amostras de discrepâncias, são apresentados na Tabela 3.5, indicando que as discrepâncias encontradas não são tendenciosas.

Tabela 3.5 – Resultado do teste z, para análise de tendência das amostras de discrepâncias.

Freq (Khz)	$ z_{cal} $	Resultado
210	1,95 ^{ns}	Não é tendencioso
33	0,33 ^{ns}	Não é tendencioso

ns não significativo

3.4.1.3 Análise da acurácia

A acurácia dos dados batimétricos nas frequências 33 kHz e 210 kHz foi avaliada

empregando os seguintes os índices estatísticos: média das discrepâncias, desvio padrão das discrepâncias (Sd) e raiz da média dos quadrados das discrepâncias (RMS_d), calculados pelas Equações 3.14, 3.15, e 3.16. Os resultados são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.6 – Índices estatísticos das discrepâncias entre os MDEs, dos dados batimétricos nas frequências 33 kHz e 210 kHz, e os pontos do levantamento topográfico.

Frequências	Média (m)	Máx (m)	Sd (m)	RMS_d (m)
210 KHZ	-0,01	0,13	0,05	0,05
33 KHZ	0,00	0,13	0,06	0,06

Os resultados encontrados para os RMS das discrepâncias, embora um pouco menores para a frequência 210 kHz, apresentaram pequenas variações. Optou-se então por aplicar a estatística inferencial na média, empregando o teste z.

Aplicando o teste z, conforme Equação 3.13, percebe-se, dentro de um nível de confiança de 95%, as médias das frequências 33 kHz e 210 kHz não se diferem.

A Tabela 3.7 apresenta os resultados do teste z, mostrando que dentro de um nível de confiança de 95%, a média das discrepâncias dos interpoladores KO e KS não é significativa, ou seja, não diferem. Já os interpoladores TR_Padrão e TR_Cond apresenta diferença significativa na média.

A Tabela 3.7 apresenta os resultados do teste z, mostrando que dentro de um nível de confiança de 95%, os RMS das discrepâncias dos interpoladores não diferem.

Tabela 3.7 – Estatística inferencial para o teste z.

Freq (kHz)	zcal
210	1,960 ^{ns}
33	0,816 ^{ns}

ns não significativo

3.5 Conclusões e recomendações

A aplicação do método de interpolação por krigagem para construção dos MDEs necessita de uma série de análises prévias que em outros métodos não seriam necessárias,

como por exemplo, pode-se citar a remoção de tendência e a determinação de dependência espacial.

Considerando a metodologia proposta para avaliar os MDEs do levantamento batimétrico, os resultados obtidos para profundidades média de 3,21 m, são: para a frequência de 33 kHz a discrepância máxima encontrada foi de 13 cm, a discrepância média de 0,5 cm, o desvio padrão da amostra de discrepância 5 cm e o RMS_d foi de 6 cm. Para a frequência de 210 kHz encontrou-se, para estes mesmos índices estatísticos, os seguintes valores, respectivamente: 13 cm, -1 cm, 5 cm e 5 cm.

Resumindo pode-se dizer que os MDEs apresentam uma acurácia em torno de 5 cm e que, como os levantamentos foram realizados após a limpeza da caixa, com água limpa, não se verificou diferença significativa na acurácia dos MDEs gerados com as profundidades levantadas com as frequências 33 kHz e 210 kHz.

Agradecimentos:

Ao Departamento de Engenharia Civil - Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Viçosa – UFV pelo apoio a esta pesquisa.

A Divisão de Água e Esgoto da UFV por colaborar com local de pesquisa.

Ao corpo de bombeiros da UFV por sempre atender aos pedidos solicitados para auxiliar nos trabalhos de campo.

4 AVALIAÇÃO DO USO DE ECOBATÍMETRO NA DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE LAMA EM CAIXAS DE DECANTAÇÃO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Artigo intitulado “**Avaliação do uso de ecobatímetro na determinação do volume de lama em caixas de decantação de estação de tratamento de água**” em fase de conclusão para posterior submissão ao Journal of Hydrologic Engineering, na versão original em inglês.

EDILSON JOSÉ DO CARMO¹

DALTO DOMINGOS RODRIGUES¹

GERSON RODRIGUES DOS SANTOS²

¹ Universidade Federal de Viçosa – UFV

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Informações Espaciais

Universidade Federal de Viçosa, Campus de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, S/N,
Campus Universitário – Cep: 36570-900 – Viçosa-MG

²Universidade Federal de Viçosa – UFV

Departamento de Estatística

Universidade Federal de Viçosa, Campus de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, S/N,
Campus Universitário – Cep: 36570-900 – Viçosa-MG

edilson.carmo@ufv.br, dalto@ufv.br, gerson.santos@ufv.br

RESUMO

O presente trabalho visa avaliar o uso de um ecobatímetro, que opera nas frequências 33 e 210 kHz, na determinação de volumes de água e lama em uma caixa de decantação de estação de tratamento de água. Numa caixa cilíndrica, com aproximadamente vinte metros de diâmetro e três metros de profundidade foi realizado levantamento batimétrico. Em seguida, esvaziou-se e limpou-se a caixa e, antes de enchê-la novamente, foi realizado um levantamento topográfico com estação total. Logo após o enchimento, com água e sem lama decantada,

outro levantamento batimétrico foi realizado. Para representação gráfica do fundo da caixa foram empregados modelos digitais de elevação gerados por métodos de interpolação. Aplicando a krigagem ordinária com remoção de tendência, método que apresentou melhores resultados, geraram-se os modelos digitais e calcularam-se os volumes. Após analisar os resultados verificou-se que usando somente o primeiro levantamento batimétrico, com as frequências 33 e 210 kHz, não se detectou 186 m³ de lama, num volume total de 799 m³ de água e lama, e que, com a água limpa, o volume determinado pela batimetria é acurado, apresentando discrepância de 0,63% para a frequência de 210 kHz e 0,12% para a frequência de 33 kHz. Para determinação do volume de lama em caixas de decantação de estações de tratamento de água recomenda-se então a confecção da planta “as built” do fundo da caixa, por topografia com a caixa vazia ou com ecobatímetro com a água limpa, e o levantamento batimétrico na época de interesse.

Palavras-chave: Caixa de decantação; água; lama; batimetria; volume.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the use of an echobathymeter, which operates in the frequencies of 33 kHz and 210 kHz, in the determining of water and mud volumes in a water treatment station decantation box. A bathymetric survey was made, in a cylindrical box with approximately 20 meters of diameter and three meters of depth. Then, the box was emptied and cleaned and, before being filled again, a topographic survey with total station was made. Right after the filling, with water and without decanted mud, another bathymetric survey was made. For the bottom of the box graphical representation, digital elevation models generated by interpolation methods were employed. Applying the ordinary Kriging with trend removal, method that presented the best results, the digital models were generated and the volumes were calculated. After the results analysis it was verified that using only the first bathymetric survey, with the frequencies of 33 and 210 kHz, 186m³ of mud weren't detected, in a total volume of 799m³ of water and mud, and that, with clean water, the volume determined by the bathymetry is accurate, presenting 0,63% discrepancy for the 210kHz frequency and 0,12% for the 33kHz frequency. For the determination of mud volume in water treatment stations decantation boxes it is recommended, then, the ‘as built’ plant production from the bottom of the box, by topography with empty box or with echobathymeter with clean water, and the bathymetric survey in the period of interest.

Key words: decantation box; water; mud; bathymetry; volume.

4.1 Introdução

Normalmente, o abastecimento de água é feito a partir do represamento de um curso d'água por barragens. A água captada por dutos é levada a uma Estação de Tratamento com uma série de impurezas, tais como bactérias, lodo, folhas, galhos, entre outras. Na estação de tratamento ela passa por uma complexa operação de limpeza, até se tornar adequada para o consumo humano.

Na operação de retirada das impurezas contidas na água, são aplicados produtos químicos que fazem com que partículas em suspensão se agreguem a partir do processo de floculação. Desses flocos, grande parte fica acumulada nos decantadores, onde são separados da água pela ação da gravidade e o restante fica acumulado nos filtros (SOUZA et al., 2004). A velocidade de decantação dos flocos segundo Berlamont et al. (1993) aumenta com a concentração, até uma concentração de, aproximadamente, 2 a 10 g/l. A partir deste estágio origina uma camada com alta concentração de sedimentos conhecida como lama fluida (Mehta & Dyer, 1990).

O sedimento decantado vai sendo acumulado no fundo do reservatório ocorrendo um processo de consolidação que pode ser descrito por um perfil vertical com variação da densidade do meio (QUARESMA, 2011). O acúmulo de grandes quantidades desses sedimentos, afeta de forma substancial o desempenho do reservatório, criando a necessidade de se realizar limpezas periódicas para a retirada dos resíduos decorrentes do processo de decantação.

Para dar um destino ecologicamente correto aos resíduos é necessário conhecer, a priori, seu volume. Sabe-se através de levantamentos realizados nas próprias estações que o volume de resíduos sólidos gerado nos decantadores é muito preocupante uma vez que hoje se busca proteger os mananciais, principalmente quanto à qualidade dos mesmos, para que num futuro próximo a situação que hoje já é alarmante não fique ainda pior.

A aplicação de métodos acústicos vem sendo largamente utilizada para o mapeamento da variação espacial e de espessura destes depósitos (Fontein & van der Wal, 2006; Quaresma, 2011; Holland et al., 2009; Schettini et al., 2010).

Um dos principais produtos derivados do levantamento batimétrico é o volume, que pode ser estimado a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) da superfície submersa e um plano de referência.

Para geração dos MDEs é necessário utilizar interpoladores que estimam a variável em estudo para locais não amostrados, fazendo com que a variável seja representada de forma contínua (CAMARGO, 1998). Os interpoladores podem ser baseados em métodos de estatística clássica ou Geoestatística (krigagem).

Em trabalhos realizados por Ferreira (2013) foi feita uma 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, mostrando que mesmo com poucos dados a krigagem é o melhor preditor linear para locais não amostrados.

Este trabalho tem como objetivo quantificar o volume de material decantado através de métodos topográficos e/ou ecobatimétricos em uma caixa de decantação.

4.2 Introdução ao ecobatímetro

Os ecobatímetros, derivados dos sonares militares, são equipamentos que detectam e localizam objetos na água usando o pulso sonoro. Quanto à geração e recepção do sinal sonoro, há dois tipos de ecobatímetros: os passivos, que captam o som emitido por objetos na água e os ativos que emitem e recebem as ondas sonoras refletidas. A maioria dos ecobatímetros existentes no mercado pertence a este segundo tipo.

Os ecobatímetros podem ser “monofeixe” ou “multifeixe”. A principal diferença entre os “monofeixe” e “multifeixe”, está na amostragem do fundo, sendo que o segundo faz uma varredura completa do fundo, enquanto o outro deixa áreas não amostradas entre as linhas de regulares e de verificação. Os ecobatímetros “monofeixe” têm sido utilizados em levantamentos hidrográficos desde meados do século XX (IHO, 2008).

O princípio fundamental de funcionamento do ecobatímetro consiste na conversão da energia elétrica em energia acústica e vice-versa. Constitui-se basicamente de um gerador de pulsos e um transdutor, responsável pela emissão e recepção dos pulsos acústicos. Existem outros dispositivos semelhantes, como o projetor, que apenas transmite e o hidrofone, que somente recebe a onda acústica (IHO, 2008).

A maioria dos ecobatímetros existentes no mercado opera em uma faixa de frequência entre 33 e 200 kHz (QUARESMA, 2011). Segundo Souza (2008), a utilização de equipamentos de altas frequências não é adequada para análises de espessura de camadas sedimentares, pois apresentam baixa potência. No entanto, para aplicações em reservatórios de decantação, ecobatímetros que trabalham na faixa de 15 a 33 kHz podem apresentar resultados satisfatórios.

4.3 Propagação de ondas sonoras na água

O som se propaga na água numa série de frentes de pressão conhecida como onda compressional. A velocidade com que a onda compressional se propaga é a velocidade do som na água, no local. No meio marinho, a velocidade do som varia entre 1400 e 1570 m/s. Em um ambiente padrão (condições ideais), esta velocidade está em torno de 1500 m/s, quatro vezes mais rápida do que a velocidade do som no ar (SIMÕES, 2007). Segundo este mesmo autor, uma onda sonora carrega uma quantidade de energia acústica que é medida por equipamentos sensíveis às oscilações de pressão causadas pelo movimento da onda compressional.

O pulso sonoro gerado na água expande-se radialmente num feixe em forma de um cone orientado verticalmente, na verdade, uma forma idealista de como as coisas funcionam, pois existe energia fora deste cone, com intensidade reduzida (HYDROBOX, 2006). A abertura deste feixe é medida em graus, como mostra a Figura 4.1.

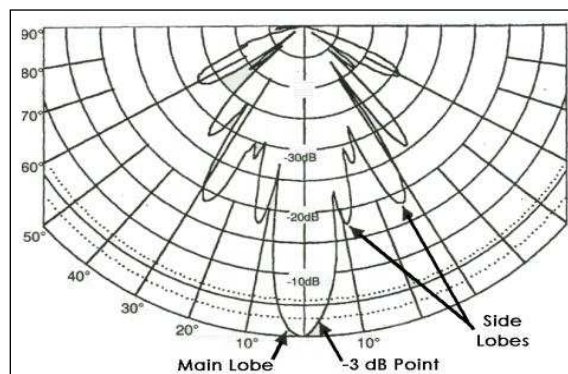


Figura 4.1 – Feixe acústico do monofeixe. Fonte: manual hydrobox, 2006.

A projeção do feixe acústico em um fundo aquático plano é a base do cone formado pelo ângulo do feixe, conforme Figura 4.2. A altura deste cone corresponde à profundidade abaixo do transdutor. Pode-se verificar que quanto maior a profundidade maior será a área da base deste cone, determinada pela Equação 4.1.

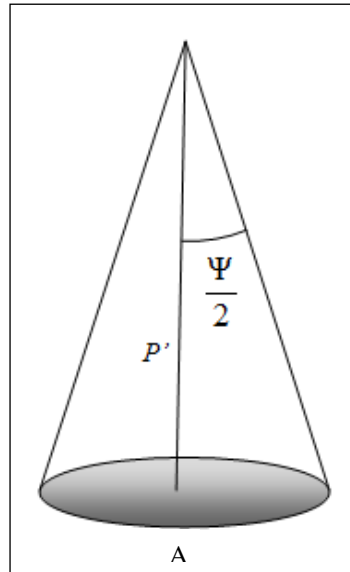


Figura 4.2 – Projeção do feixe.

$$A = \pi \cdot \left[p' \cdot \tan\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right]^2 \quad (4.1)$$

onde A é a área da base do cone formado pelo feixe; p' é a profundidade a baixo do transdutor e Ψ é o ângulo de abertura do feixe.

A energia acústica transmitida viaja através da coluna de água até atingir o fundo ou algum outro obstáculo qualquer. Ela espalha em áreas cada vez maiores causando perda da energia inicial. O total de perda de transmissão que afeta uma onda sonora depende da distância que ela se propaga – quanto maior a distância percorrida, mais fraca a onda fica. Ao tocar o fundo, parte da energia da onda sonora é transmitida ao substrato (NETO, 2000). Areias e siltes absorvem mais energia, ao contrário de rochas e objetos metálicos. Outra parte da energia é retro espalhada em direções variadas e outra, refletida, retorna ao transdutor, onde é detectada (MEDWIN e CLAY, 1998).

O tempo decorrente da emissão e recepção da onda sonora é então medido pelo ecobatímetro. No entanto, o sinal de retorno ou eco detectado pelo transdutor pode ter sido originado em qualquer ponto localizado dentro dessa área da base do cone projetada pelo feixe no fundo marinho.

Conhecendo a velocidade de propagação do som na água é possível calcular uma medida aproximada da profundidade local, denominada sondagem, através da Equação 4.2 (IHO, 2008; SOUZA, 2011).

$$S = 0,5 \cdot v \cdot t \quad , \quad (4.2)$$

onde S é medida aproximada da profundidade local (sondagem); v é a velocidade de propagação do som na água e t o intervalo tempo gasto pelo sinal para ir ao fundo e retornar.

4.4 Materiais e métodos

As medidas utilizadas neste trabalho foram realizadas em uma caixa de decantação da estação de tratamento de água (ETA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). A caixa de decantação possui aproximadamente 20 m de diâmetro e 3,21 m de profundidade. O local foi escolhido por apresentar características favoráveis a uma área experimental.

As medidas foram realizadas em levantamentos topográfico e batimétricos. O levantamento topográfico foi feito com uma estação total com precisão nominal angular de 5 segundos e linear de $3 \text{ mm} \pm 3 \text{ ppm}$, no dia da limpeza da caixa d'água, com a caixa vazia, levantando todas as feições de interesse para uma melhor representação do fundo. Este levantamento demandou uma avaliação criteriosa da melhor metodologia de levantamento, para que pudesse ser realizado o mais rápido possível, após a limpeza, de forma a não prejudicar o abastecimento de água. Um modelo 3D da caixa é apresentado na Figura 4.3.

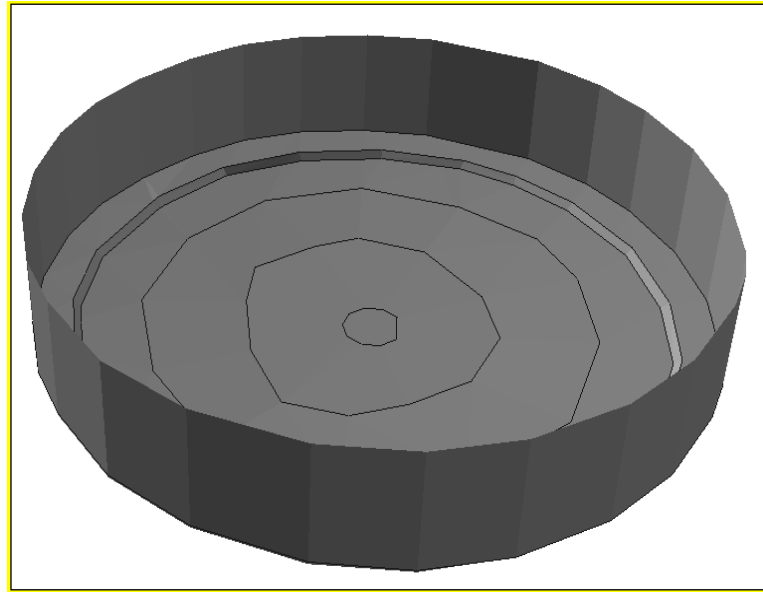


Figura 4.3 – Modelo 3D da caixa de decantação.

Nos levantamentos batimétricos, as medidas foram realizadas utilizando um ecobatímetro Monofeixe Hydrobox da Syqwest Inc., com precisão nominal de 2,5 cm para profundidades variando de 0 a 40 m; 5,0 cm para profundidades variando de 40 a 200 m e 10,0 cm para profundidades maiores de 200 m.

O ecobatímetro usado opera nas frequências 33 kHz e 210 kHz com feixes de abertura próximos à vertical. O feixe acústico da frequência baixa (33 kHz) é refletido pela superfície de lama já consolidada no fundo e o feixe acústico da frequência alta (210 kHz) é refletido pela superfície de lama fluídica. Com isso espera-se obter estimativas dos volumes de lama fluídica e sólida depositada no fundo da caixa.

Foram realizados dois levantamentos batimétricos “monofeixe”: o primeiro, denominado levantamento 1, realizado antes da limpeza da caixa d’água, ainda com os resíduos sólidos resultantes do processo de decantação das substâncias em suspensão na água; e o segundo, levantamento 2, realizado imediatamente após a limpeza e o enchimento da caixa.

O posicionamento planimétrico das sondagens foi feito por irradiação, empregando a mesma estação total utilizada no levantamento topográfico.

Antes de cada levantamento batimétrico foi realizada a calibragem do ecobatímetro utilizando uma chapa metálica (Bar check) fixada a um cabo de aço de 5 m, graduado de 0,5 em 0,5 m. Com a calibração obteve-se, para velocidade de propagação do som na água da caixa, o valor de 1481 m/s. Este valor foi inserido no software Hydrobox Acquisition. A

temperatura da água foi observada a cada metro de profundidade durante todo o levantamento não se verificando mudança, permanecendo o valor constante de 25°C.

Como na área de estudo não foi possível usar uma embarcação, o transdutor juntamente com o prisma refletor foram colocados em um suporte de madeira sobre uma câmara pneumática, conforme Figura 4.4.



Figura 4.4 – Suporte para adaptar o transdutor e prisma (Figura 4.4-a). Demais equipamentos (baterias e computador) na Figura 4.4-b.

Para a movimentação do suporte com o transdutor e o prisma na água utilizou-se uma corda. A utilização deste suporte diminuiu a aglomeração de muitos equipamentos, como computador e baterias, o que poderia comprometer a realização da coleta de dados.

As profundidades devem ser obtidas a partir de um nível de redução, uma vez que, normalmente, a cota do nível da água varia com o tempo (IHO, 2008; RAMOS, 2008). Neste trabalho, como não houve variação do nível da água durante o levantamento, o nível de redução foi atribuído à borda superior da caixa de decantação.

Para compatibilizar os dados do levantamento topográfico com os dos levantamentos batimétricos, as cotas obtidas no levantamento topográfico foram convertidas para o mesmo referencial altimétrico. Portanto, as cotas referentes à borda superior da caixa foram reduzidas de forma que seu valor fosse 0,75 metros.

Assim como em um levantamento topográfico o resultado primário de um levantamento batimétrico é uma lista de pontos com coordenadas tridimensionais (X, Y, Z). Após a coleta, os dados de cada levantamento batimétrico foram processados, gerando cinco arquivos de pontos com coordenadas planialtimétricas (X, Y, Z): dois arquivos para cada levantamento batimétrico (um para cada frequência 33 kHz e 210 kHz) e um para o levantamento topográfico.

Em seguida, as medidas foram submetidas a uma análise exploratória, por meio da estatística descritiva.

Na análise exploratória das amostras de profundidades foram calculados os seguintes índices: valor mínimo, mediana, valor máximo, média, desvio padrão, coeficiente de assimetria e curtose.

Após a análise exploratória, as medidas dos levantamentos topográfico e batimétricos foram interpoladas pelo método de krigagem para locais não amostrados, construindo-se uma superfície contínua, comumente conhecida como Modelo Digital de Elevação (MDE). Foram gerados MDEs para as frequências 33 kHz e 210 kHz dos dois levantamentos batimétricos e do levantamento topográfico. Após a geração dos modelos foram calculados e comparados os volumes.

Para interpolação por krigagem deve-se fazer uma análise geoestatística, indispensável para a utilização do método. Esta análise tem como objetivo verificar a existência de tendência, além de quantificar o grau de dependência espacial da variável a ser interpolada, através do ajuste de modelos teóricos aos semivariogramas experimentais (SANTOS, 2011).

Caso seja detectada tendência nas observações, deve-se remove-la a partir de um ajuste de polinômios de baixo grau e o modelo do semivariograma experimental se dá a partir dos dados não tendenciosos. Nesta situação Landim (2002), recomenda utilizar a chamada krigagem com tendência ou krigagem universal, sendo o MDE final o resultado do MDE dos dados não tendenciosos adicionado ao MDE de tendência.

4.5 Resultados e discussão

Os resultados da análise exploratória das profundidades medidas, utilizando a estatística descritiva, nos levantamentos topográfico e batimétricos, para as frequências 33 kHz e 210 kHz encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados da análise exploratória das amostras profundidades observadas nos levantamentos topográfico e batimétricos 1 (Bat. 1) e 2 (Bat. 2), antes e depois de limpar a caixa, respectivamente.

	Freq	Max (m)	Média (m)	Mediana (m)	Min. (m)	Sd (m)	Ca	Cc
Topo		3,55	3,21	3,29	2,98	0,20	-0,45	1,81
Bat. 1	33 (kHz)	3,12	2,56	2,62	2,01	0,23	0,40	2,22
	210 (kHz)	2,97	2,46	2,51	2,06	0,23	0,34	2,20
Bat. 2	33 (kHz)	3,65	3,27	3,29	2,98	0,23	-0,03	1,44
	210 (kHz)	3,60	3,30	3,33	2,98	0,23	0,05	1,38

Ca= Coeficiente de assimetria; Cc= Coeficiente de curtose.

A amostra de profundidades do levantamento batimétrico realizado antes da limpeza, Bat. 1, (frequências 33 kHz e 210 kHz), apresenta assimetria positiva moderada; já a do levantamento batimétrico após a limpeza, apresenta assimetria negativa baixa para frequência de 33 Khz e positiva baixa para frequência de 210 Khz. Considerando que são simétricas as amostras com $|Ca| < 0,15$; moderadamente assimétricas com $0,15 \leq |Ca| < 1$ e fortemente assimétricas com $|Ca| \geq 1$. Fazendo a mesma análise para a amostra do levantamento topográfico, pode-se dizer que ela apresenta assimetria negativa moderada. A medida de assimetria indica o grau de distorção da distribuição em relação a uma distribuição simétrica.

Considerando os valores dos desvios padrão, pode-se dizer que todas as amostras apresentam variabilidade baixa, são homogêneas.

Na análise geoestatística, verificou-se que os dados apresentaram tendência espacial de segunda ordem, conforme se pode ver nos gráficos de tendência mostrados, na Figura 4.5, para o levantamento topográfico; na Figura 4.6, para as frequências 33 kHz e 210 kHz do levantamento Bat. 1; e na Figura 4.7, para as frequências 33 kHz e 210 kHz do levantamento Bat. 2. O que está de acordo com a realidade, pois se trata de um objeto com pronunciada inclinação.

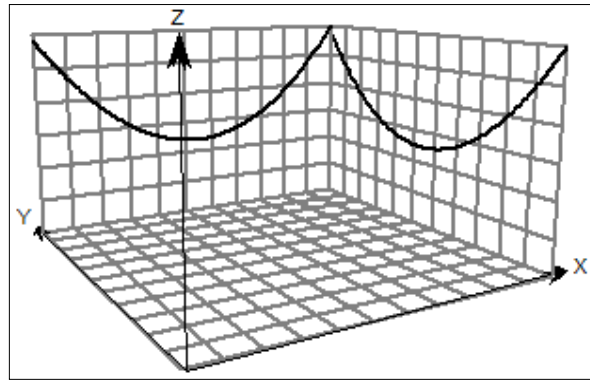


Figura 4.5 – Gráfico de tendência do levantamento topográfico.

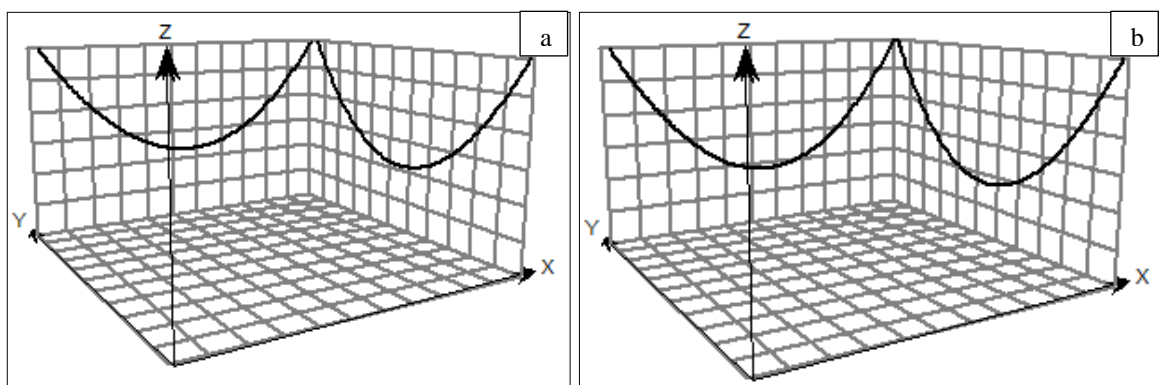


Figura 4.6 – Gráfico de tendência para a frequência de 33 k kHz (Figura 4.6-a) e gráfico de tendência para a frequência de 210 kHz (Figura 4.6-b). Ambos para o Bat. 1.

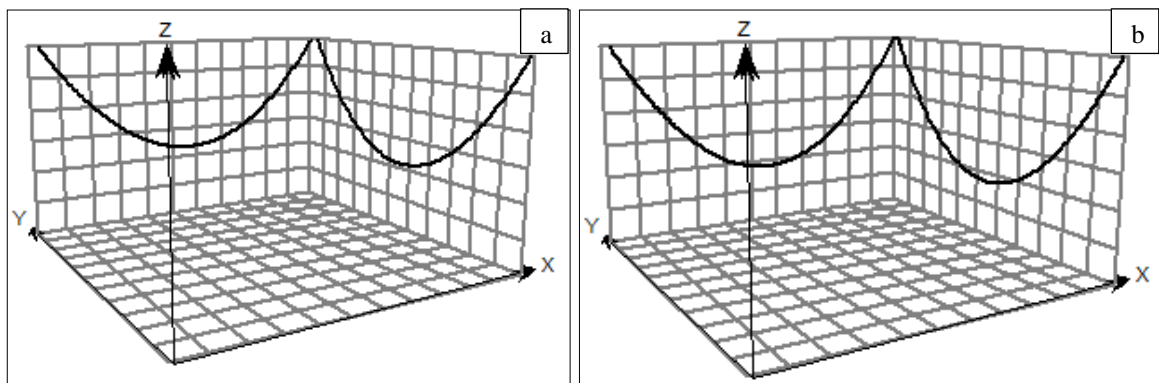


Figura 4.7 – Gráfico de tendência para a frequência de 33 kHz (Figura 4.7-a) e gráfico de tendência para a frequência de 210 kHz (Figura 4.7-b). Ambos para o Bat. 2.

Após verificar a presença de tendência nos dados, o recomendado é realizar a krigagem com remoção de tendência e modelar o semivariograma experimental a partir dos valores não tendenciosos. Já para os levantamentos batimétricos, após verificar a presença de tendência nos dados, deu-se continuidade com a krigagem com remoção de tendência e modelaram-se

os semivariogramas experimentais das frequências 33 kHz e 210 kHz, a partir dos valores não tendenciosos para os levantamentos Bat. 1 e Bat. 2.

O modelo teórico que melhor se ajustou ao semivariograma experimental na modelagem da dependência espacial foi o gaussiano. O modelo gaussiano é um modelo transitivo, que apresenta um crescimento lento da função do variograma, com o comportamento parabólico na origem. É muito utilizado para modelar fenômenos extremamente contínuos e regulares (Isaaks e Srivastava, 1989).

Os modelos ajustados para os levantamentos, topográfico e batimétricos (Bat. 1 e Bat. 2) podem ser vistos nas Figura 4.8 a 4.12, respectivamente. Vale ressaltar que os semivariogramas apresentados, correspondem aos semivariogramas dos valores não tendenciosos.

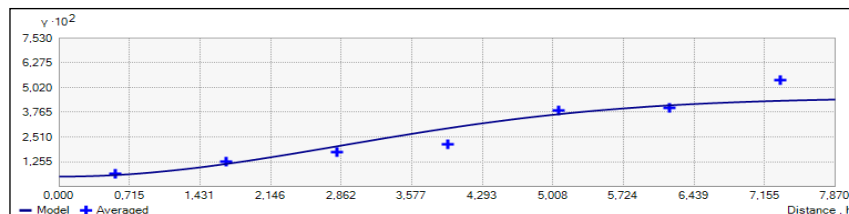


Figura 4.8 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado para as observações do levantamento topográfico.

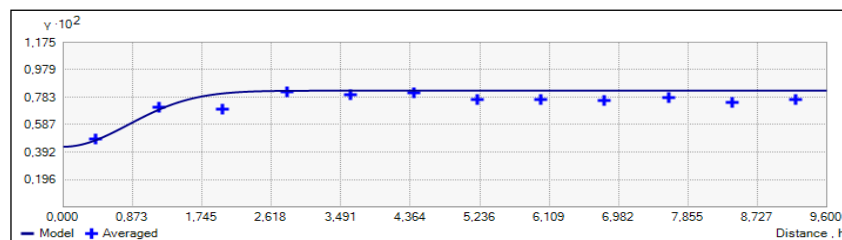


Figura 4.9 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado para as observações do levantamento Bat. 1, frequência 33 kHz.

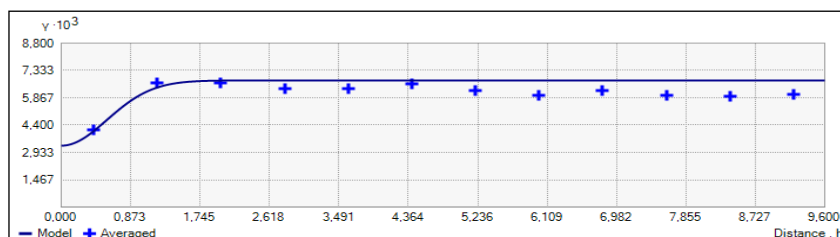


Figura 4.10 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado para as observações do levantamento Bat. 1, frequência 210 kHz.

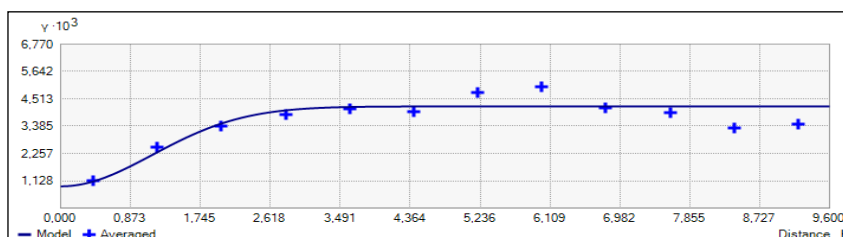


Figura 4.11 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado para as observações do levantamento Bat. 2, frequência 33 kHz.

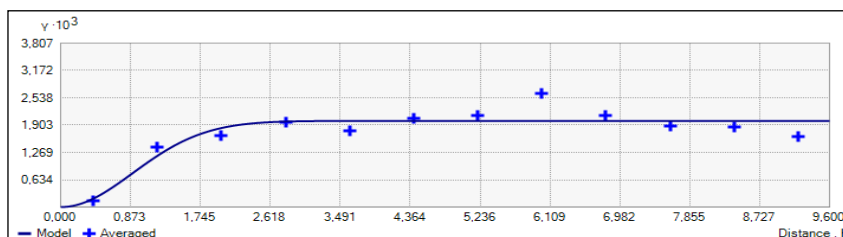


Figura 4.12 – Semivariograma experimental e modelo gaussiano ajustado para as observações do levantamento Bat. 2, frequência 210 kHz.

Após análise dos semivariogramas os modelos digitais foram gerados o que possibilitou a determinação dos volumes.

Os volumes encontrados empregando os MDEs resultantes das medidas topográficas e batimétricas, podem ser vistos na Tabela 4.2. Onde usando somente o levantamento Bat. 1, encontrou-se o volume de 613 m^3 para frequência 33 kHz e 589 m^3 para frequência 210 kHz, fazendo a diferença entre os valores, encontra-se o valor de 24 m^3 .

Já para o levantamento Bat. 2, encontrou-se o volume de 804 m^3 para frequência 33 kHz e 800 m^3 para frequência 210 kHz.

Tabela 4.2 – Volumes estimados empregando os MDEs topográfico e batimétricos – Bat. 1 e Bat. 2.

Levantamento	Frequência	Vol. calculado (m ³)
Topo		799
Bat. 1	210 kHz	589
(Água com lama)	33 kHz	613
Bat. 2	210 kHz	800
(Água limpa)	33 kHz	804

4.6 Conclusões e recomendações

Empregando os modelos digitais de elevação gerados por krigagem, aplicada às observações do levantamento batimétrico realizado antes de limpar uma caixa de decantação, com as duas frequências, estimou-se um volume de 589 m³ de água e 24 m³ de lama líquida - lama que transmite a frequência 33 kHz e não transmite a de 210 kHz - totalizando 613 m³.

Comparando os valores dos volumes calculados empregando estes modelos digitais com o gerado pelo levantamento topográfico, encontra-se um volume de 186 m³ de lama impenetrável pela frequência 33 kHz e, portanto, não detectável pelo ecobatímetro. O valor não detectável pode ser explicado pelo fato de que durante o processo de decantação o fluxo de água nos poros e o peso do sedimento, cria um estresse que é transmitido de partícula a partícula o que leva a uma contínua perda de água no depósito, até um limite onde a suspensão passa de lama fluida a um fundo coesivo propriamente dito.

Comparando os resultados dos levantamentos topográfico e batimétrico realizado com a água limpa, verifica-se que o volume de água determinado com a frequência de 210 kHz ficou bem próximo do determinado com a topografia, diferindo em apenas 1 m³, 0,12%. Já o determinado com a frequência de 33 kHz diferiu do topográfico em 5 m³, 0,63%.

Conclui-se, portanto, que somente com o primeiro levantamento batimétrico, com as frequências 33 e 210 kHz, não se detectou 186 m³ de lama, num volume total de 799 m³ de água e lama, e que, com a água limpa, o volume determinado empregando este instrumento é acurado, apresentando discrepância de 0,63% para a frequência de 33 kHz e 0,12% para a frequência de 210 kHz.

Para determinação do volume de lama em caixas de decantação de estações de

tratamento de água, recomenda-se então a confecção da planta “as built” da caixa, por topografia com a caixa vazia ou com ecobatímetro com a água limpa, e o levantamento batimétrico na época de interesse. Assim, é possível determinar o volume de lama mais densa, que não transmite a frequência 33 kHz, e o volume de lama líquida, que transmite 33 kHz e não transmite a frequência acústica de 210 kHz, em Estações de Tratamento de Água.

Agradecimentos:

Ao Departamento de Engenharia Civil - Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Viçosa – UFV pelo apoio a esta pesquisa.

A Divisão de Água e Esgoto da UFV por colaborar com local de pesquisa.

Ao corpo de bombeiros da UFV por sempre atender aos pedidos solicitados para auxiliar nos trabalhos de campo.

5 ANÁLISE DA QUALIDADE DA REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE SUPERFÍCIES BATIMÉTRICAS UTILIZANDO OS INTERPOLADORES KRIGAGEM E TOPO TO RASTER VARIANDO O ESPAÇAMENTO ENTRE AS SEÇÕES

Artigo intitulado “Análise da qualidade da representação computacional de superfícies batimétricas utilizando os interpoladores krigagem e Topo to Raster variando o espaçamento entre as seções” em fase de conclusão para posterior submissão à Revista Brasileira de Recursos Hídricos, na versão original em português.

EDILSON JOSÉ DO CARMO¹

DALTO DOMINGOS RODRIGUES¹

GERSON RODRIGUES DOS SANTOS²

¹ Universidade Federal de Viçosa – UFV

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Informações Espaciais

Universidade Federal de Viçosa, Campus de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, S/N,
Campus Universitário – Cep: 36570-900 – Viçosa-MG

²Universidade Federal de Viçosa – UFV

Departamento de Estatística

Universidade Federal de Viçosa, Campus de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, S/N,
Campus Universitário – Cep: 36570-900 – Viçosa-MG

edilson.carmo@ufv.br, dalto@ufv.br, gerson.santos@ufv.br

RESUMO

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a qualidade da representação computacional de superfícies batimétricas variando o espaçamento entre as linhas regulares de sondagem. Os dados utilizados foram levantados em uma das lagoas localizada no município de Capitólio-MG. Para tal foi efetuado um levantamento batimétrico automatizado,

empregando métodos de topografia e batimetria para a aquisição de dados sobre o relevo do fundo do represamento. Estes foram processados e analisados para a posterior geração do MDE utilizando interpoladores krigagem e Topo to Raster. Foram realizados estudos visando quantificar os erros cometidos na modelagem e comparar a eficiência dos interpoladores em diferentes malhas ou GRIDs amostrais. Como resultados principais verificou-se que a krigagem representou a batimetria local de forma mais acurada, comparativamente aos outros métodos estudados, para espaçamentos menores, 20 a 80 m. Já para espaçamentos maiores, de 160 a 320 m, o Topo to Raster foi o que melhor representou o relevo submerso. O volume de água do reservatório foi estimado em 6,5 milhões de metros cúbicos. A diferença nos volumes determinados com espaçamentos de 20 e 40 metros foi menor que 3%. Para um nível de detalhamento da superfície submersa confiável não recomenda-se espaçamentos entre linhas regulares de sondagem maiores que 40 metros.

Palavras-chave: Levantamento batimétrico; Ecobatímetro; Seções.

ABSTRACT

This study aimed to assess the quality of the computational representation of bathymetric surfaces varying the spacing between sections. The data were collected in one of the ponds in the municipality of Capitól-MG. For this was made an automated bathymetric survey, employing methods of topography and bathymetry for acquiring data about the relief fund of the impoundment. These were processed and analyzed for the subsequent generation of MDE using kriging interpolation and Topo to Raster. Studies were conducted to quantify the errors in modeling and compare the efficiency of different knits interpolating or sampling grids. The main results it was found that the local bathymetry kriging represented more accurately compared to other methods studied for smaller spacings 20 to 80 m. Longer for larger spacings, 160-320 m, Top to Raster was best represented the submerged relief. The water volume of the reservoir was estimated at 6.5 million cubic meters.

Key words: Bathymetric survey; echobathymeter; Sections.

5.1 Introdução

O território brasileiro possui o maior potencial hídrico do mundo (ANA, 2011), sendo composto por: oceanos, Rios, Ribeirões, lagos, que variam no tamanho e em sua forma, navegáveis ou não. A utilização dessas águas é indispensável para as atividades humanas, tais

como: abastecimento público e industrial, a irrigação agrícola, a produção de energia elétrica e as atividades de lazer e recreação (ALVES et al., 2008). Estas informações tornam evidente a importância de se conhecer com maior precisão as fluentes mudanças das superfícies submersas. Para isso, aplicam-se os levantamentos batimétricos.

Nos levantamentos batimétricos as profundidades podem ser observadas de forma direta com uso de prumo de mão, máquina de sondar e estadias ou de forma indireta, com uso de ecobatímetros monofeixe e multifeixe.

Na batimetria monofeixe a superfície a ser mapeada deve ser dividida em uma malha de linhas equidistantes. Essas linhas são chamadas de linhas regulares de sondagem que podem ser paralelas, circulares, radiais ou em ziguezague (MARTINI, 2007). Devido à dificuldade de se obter redundância nas observações, a precisão das medidas batimétricas é avaliada empregando linhas de verificação. Estas linhas devem cruzar as linhas regulares o mais perpendicular possível, formando assim um segundo conjunto de dados. A partir destes cruzamentos, devido a não amostragem total do fundo, estipula-se um raio de busca onde são comparadas as duas profundidades, possibilitando obter uma estimativa da precisão do levantamento analisando as discrepâncias entre as duas amostragens.

A definição do espaçamento entre as linhas regulares e de verificação é de grande importância para otimização da relação custo/benefício nos levantamentos batimétricos. Espaçamentos pequenos aumentam o custo e grandes diminuem a acurácia da representação gráfica da superfície submersa e do volume determinado. Vários autores sugerem formas de se planejar essas linhas (BLANTON, 1982; USACE, 1989; CARVALHO et al., 2000; WMO, 2003; FERRARI, 2006; ANA, 2011; IHO, 2008).

As profundidades medidas no levantamento batimétrico, associadas a uma posição na superfície, são utilizadas para representar as curvas isobatimétricas e construir os MDEs, com a finalidade de visualizar o relevo submerso dos corpos d'água (KRUEGER, 2003; RAMOS, 2007).

A construção dos MDEs é feita com a aplicação de interpoladores para prever as profundidades nos locais não amostrados. Várias pesquisas foram e estão sendo feitas com relação aos métodos de interpolação que melhor represente a superfície batimétrica. Em muitas destas pesquisas os interpoladores testados são os métodos Inverso Ponderado da Distância (IDW), krigagem e Topo to Raster.

Os principais objetivos de se realizar um levantamento batimétrico em um reservatório é conhecer as profundidades, das superfícies batimétricas, e determinar o volume de água (FERREIRA, 2013). Este pode ser determinado utilizando-se ferramentas computacionais, com auxílio de softwares de geoprocessamento.

Este trabalho tem como objetivo analisar, comparativamente, a eficiência da krigagem e do Topo to Raster na representação computacional de superfícies batimétricas, variando de forma decrescente o espaçamento entre as linhas regulares de sondagem.

5.2 Interpoladores

Segundo Mesquita (2009) na base das técnicas de interpolação mais frequentemente utilizadas está a primeira lei da Geografia ou Lei de Tobler (1970) que afirma: “*Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things*”. O que para efeitos de aplicação se pode traduzir como “pontos vizinhos no espaço estão mais correlacionados que pontos distantes”.

Segundo Burrough e Mcdoneel (1998), quando existem dados abundantes, a maioria das técnicas de interpolação produz valores semelhantes e no caso de dados esparsos alguns métodos possuem limitações na representação da variabilidade espacial, porque desconsideram a anisotropia e a continuidade do fenômeno que se quer observar.

Na krigagem são levadas em consideração características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas, com continuidade espacial, possibilitando que os dados amostrados sejam usados para a estimação da variável regionalizada nos lugares em que ela não foi medida, (LANDIM, 2000). Segundo o mesmo autor, se for constatado que a variável não possui continuidade espacial, não se deve usar a krigagem como interpolador.

O termo krigagem é derivado do nome Daniel G. Krige, que foi o pioneiro em introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática do volume de reservas em mineração (DELFINER e DELHOMME, 1975).

Segundo Soares (2006) a principal diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação está na maneira como os pesos são atribuídos a diferentes amostras, sendo determinados, principalmente, por uma análise espacial baseada no semivariograma experimental. Segundo Santos et al (2011), o semivariograma experimental é uma ferramenta fundamental para descrever quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno

regionalizado. O estimador do semivariograma é obtido a partir do cálculo das semivariâncias $\hat{\gamma}(\Delta d)$ dadas pela Equação 5.1:

$$\hat{\gamma}(\Delta d) = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{i=1}^N [Z(l_i) - Z(l_i + \Delta d)]^2 \quad (5.1)$$

em que N 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 $\hat{\gamma}(\Delta d)$ aumente com a distância (CAMARGO, 1998; FERREIRA, 2012).

Estimando as semivariâncias para cada Δd , é possível verificar o comportamento espacial da variável Z em estudo, em relação à distância. Este comportamento pode ser visualizado em forma de gráfico ou tabela.

Segundo Schaffrath (2006), numa representação gráfica das semivariâncias, como a mostrada na Figura 5.1, podem ser identificados os seguintes parâmetros:

- **Alcance:** materializa a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- **Patamar:** é o valor da semivariância correspondente ao seu Alcance (A). A partir deste ponto considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, dado que a variação da diferença entre pares de amostras torna-se aproximadamente constante;
- **Efeito Pepita:** representa a interseção da curva com o eixo $\hat{\gamma}(0)$. Em que o resultado ideal é $\hat{\gamma}(0) = 0$. No entanto, para a maioria dos fenômenos estudados existe uma descontinuidade do semivariograma para distâncias menores que a menor distância entre as amostras, então, $\hat{\gamma}(0) \neq 0$. De acordo com Camargo (1998), parte desta descontinuidade pode ser atribuída à imprecisão da medição, mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém desta imprecisão ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.

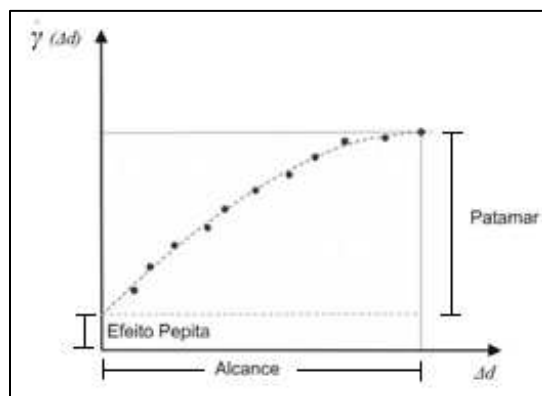


Figura 5.1 – Semivariograma e seus parâmetros. (Fonte: Adaptado de Burrough e McDonnel (1998).

Caso exista dependência espacial na variável medida, pode-se fazer predições em locais não amostrados, por meio de um preditor não tendencioso e de variância mínima, chamado de krigagem (SANTOS et al; 2011). Segundo os mesmos autores os principais tipos de krigagem linear encontrados na literatura são: krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal e krigagem indicativa.

O método Topo to Raster é projetado especificamente para a criação de modelos digitais de elevação (MDE) hidrologicamente corretos. Foi baseada nos trabalhos desenvolvidos por Hutchinson na década de 1980 e o resultado apresentado em Hutchinson (1989) em seu programa ANUDEM da The Australian National University, e também disponibilizado no software ArcGIS 9.2. O êxito dessa técnica se dá por permitir que, além de arquivos de pontos, podem ser usados outros formatos de arquivos como curvas de nível, delimitações de rios ou lagos, contorno de penhascos e delimitações de bacias, diminuindo, durante o processo de interpolação, os possíveis erros que venham a ser cometidos pelo método.

Esta técnica de interpolação foi desenhada com o objetivo específico de converter dados vetoriais em modelos hidrológicos e de elevação de terrenos. O método se utiliza da eficiência computacional da interpolação local, como ponderação do inverso da distância, sem perder a continuidade superficial dos métodos globais de interpolação, como krigagem e spline (NOGUEIRA e AMARAL, 2009).

5.3 Planejamentos das seções ou linhas regulares de sondagem em levantamentos batimétricos

De acordo com Blanton (1982), as seções devem ser alocadas perpendicularmente ao fluxo da água, quando possível, com espaçamento de modo que a área entre duas seções seja

bem representada por elas. Em áreas de delta do reservatório e em áreas de interesse especial o espaçamento deve ser menor que em outras áreas. Segundo o mesmo autor o número de seções pode ser encontrado a partir da Equação 5.2.

$$y = 2,942 \cdot x^{0,2875} \quad (5.2)$$

onde y é o número de seções transversais e x é a área do reservatório em Acres.

Segundo o U.S. Army Corps of Engineer (USACE, 1989), quando o objetivo é obter o volume de um reservatório de fundo irregular, não há um rígido espaçamento entre as seções, podendo ser normalmente de 60 a 120 metros; podendo ser mais afastado caso o fundo apresente características mais uniformes. Afirma ainda que utilizar espaçamentos próximos pode ser economicamente inviável.

A World Meteorological Organization (WMO, 2003), apresenta um estudo baseado em dados de reservatórios da China onde o espaçamento entre as seções é dado pela Equação 5.3.

$$L_r = \frac{A}{L_t \cdot \left[\left[L_0/2 \cdot (\pi \cdot A)^{1/2} \right] \right]^{1/3}} \quad (5.3)$$

onde L_r é a distância em quilômetros entre duas seções; A é a área inscrita, ou delimitada, pela maior curva de nível correspondente, em quilômetros quadrados; L_t é a distância em quilômetros acumulada entre as seções e L_0 é o comprimento em quilômetros da maior curva de nível.

Ferrari (2006), diz que para reservatórios pequenos ou para detalhar melhor o fundo, o espaçamento pode variar de 30 a 60 metros. Para reservatórios maiores, de leito plano, com poucos detalhes, e quando o orçamento e o tempo são limitados pode se usar 150 metros, chegando até aos 600 metros. Mas, normalmente o espaçamento é de 100 metros. Nestes casos assume-se que a superfície entre as seções é uniforme, para isso deve-se monitorar estas mudanças durante a coleta dos dados e comparar com mapas pré-existentes.

A Agência Nacional de Águas (ANA, 2011), propõe que os espaçamentos entre as linhas batimétricas para o corpo do reservatório, para pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e usinas hidrelétricas (UHEs), sejam definidos pelas Equações 5.4 e 5.5, respectivamente.

$$E_{ST} = \frac{0,25 \cdot A^{0,25}}{D} \quad e \quad (5.4)$$

$$E_{ST} = \frac{0,70 \cdot A^{0,35}}{D} \quad , \quad (5.5)$$

onde E_{ST} é a equidistância das seções batimétricas, em quilômetros; A é a área do reservatório em seu nível máximo, em hectares e D é a extensão do reservatório, em quilômetros.

Para melhores precisões a ANA orienta que se deve ter um maior adensamento das seções e que o mapa deve ser adequado à escala e à dimensão do reservatório, seguindo as recomendações da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), órgão responsável por regulamentar e fiscalizar os levantamentos hidrográficos no território brasileiro, com seções a cada 1 cm no mapa. Contudo devem-se respeitar as definições apresentadas na Tabela 5.1. Caso o leito não apresente grandes variações, podem-se adotar espaçamentos maiores, de até 3,0 cm no mapa (CARVALHO et al., 2000).

Tabela 5.1 – Distanciamento das linhas regulares de sondagem ou seções transversais segundo Carvalho et al (2000).

Escala do mapa	Distância entre seções (m)	Tamanho do reservatório
1:2000	20	Pequeno
1:5000	50	Médio
1:10000	100	Médio a grande
1:20000	200	Grande
1:25000	250	Grande

Segundo a DHN, as linhas regulares de sondagem devem ser dispostas de forma perpendicular às linhas isobatimétricas da área em estudo e as linhas de verificação devem ser dispostas de modo aproximadamente perpendicular às linhas regulares de sondagem. A escala de execução do levantamento deve ser maior que a escala de confecção da carta náutica, sendo que o erro gráfico máximo permitido na carta náutica é de 0,2 mm. O espaçamento entre linhas deve ser estabelecido conforme normas da International Hydrographic Organization (IHO), seguindo especificações da publicação S-44 – 5ª edição (IHO, 2008). Nesta publicação são especificados espaçamentos entre as linhas regulares de sondagem, variando de acordo com a ordem do levantamento, que são classificados em ordem “Especial”, “1a”, “1b” e “2”. Para levantamentos de ordens especial e 1a não se utiliza ecobatímetro monofeixe, uma vez que estas classificações requerem a busca total do fundo. Já os levantamentos de ordens 1b e 2, o espaçamento máximo recomendado para as linhas regulares de sondagem é o maior valor entre os seguintes critérios: para levantamentos de ordem 1b, 3 vezes a profundidade média ou 25 metros e para levantamentos de ordem 2, 4 vezes a profundidade média.

Martini (2007), recomenda que o afastamento entre as linhas regulares deve ser equivalente a no máximo 10 mm com tolerância de 1 mm na escala de levantamento, podendo ser aumentada ou diminuída de acordo com as irregularidades do fundo submerso.

As linhas de verificação devem ser dispostas de forma que se aproxime o mais perpendicular possível das linhas regulares de sondagem, com espaçamento de até 15 vezes o utilizado para as linhas regulares de sondagem, (IHO, 2008).

5.4 Materiais e métodos

A coleta de dados foi realizada no ano de 2013 na primeira de três lagoas localizadas no município de Capitólio – centro oeste do Estado de Minas Gerais. Essa lagoa foi formada no início da década de 70, com a implantação da Usina Hidrelétrica de Furnas no rio Grande, e possui aproximadamente as seguintes medidas: Área de 1,4 km², perímetro de 7 km, comprimento longitudinal de 2,8 km e transversal médio de 0,6 km. Com a construção da barragem principal da usina as bacias do rio São Francisco e do Rio Grande se conectariam e parte da cidade de Capitólio ficaria inundada. A solução para o problema foi a construção de um dique no canal do rio Piumhi, invertendo o fluxo desse rio que desaguava na bacia do rio Grande, fazendo com que desaguasse na bacia do São Francisco. Na Figura 5.2 observa-se a localização do Dique de Capitólio, os três lagos interligados, consequentes da construção do dique (9,4 km de extensão); o Canal do rio Piumhi (10 km + 1,3 km); o canal de transposição das águas entre as duas bacias (1,5 km), além dos trechos dragados sobre os leitos do córrego Água Limpa e ribeirão Sujo (21 km). A distância do dique à confluência com o São Francisco (trecho A- F) corresponde a 43,2 km.

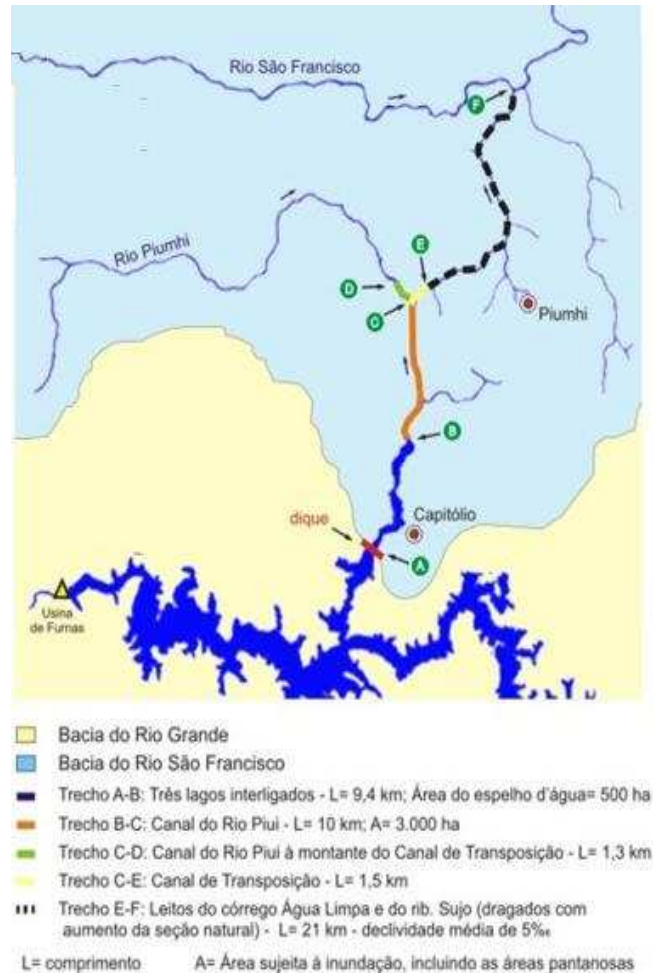


Figura 5.2 – Limites das áreas de drenagem das bacias do rio Grande e do São Francisco após a transposição das águas e ilustração do percurso das obras de dragagem após a transposição das águas. Fonte: Adaptado do ATLAS digital das águas de Minas Gerais.

Antes do levantamento batimétrico foi realizado o planejamento das linhas de sondagem com espaçamento de 20 metros para as linhas regulares e de 100 metros para as linhas de verificação.

No levantamento batimétrico as coordenadas planimétricas (E e N), foram determinadas empregando-se o posicionamento relativo cinemático em tempo real – Real Time Kinematic (RTK) - com receptor de dupla frequência (L1/L2).

A terceira dimensão, coordenada Z (profundidade), foi determinada com o uso de um ecobatímetro monofeixe. Esse aparelho determina a profundidade, medindo o tempo de propagação de sinais sonoros emitidos pelo transdutor e refletidos pela lama líquida (Sondagem). As profundidades são determinadas somando aos valores das sondagens ao valor do draft. Este valor está associado à montagem da estação móvel, ao peso do barco e ao peso

em seu interior. Sendo assim, o draft foi medido quando todos os equipamentos e componentes da equipe (timoneiro e operador) estavam a bordo da embarcação de sondagem e em seus devidos lugares, conforme sugere Ferreira (2013).

O ecobatímetro usado opera em duas frequências 33 kHz e 210 kHz e feixes de abertura próximos à vertical. O feixe acústico da frequência baixa (33 kHz) é refletido pela superfície de lama já consolidada no fundo e o feixe acústico da frequência alta (210 kHz) é refletido pela superfície de lama líquida.

Inicialmente, foi feita a calibragem do ecobatímetro utilizando uma chapa metálica (Bar check) fixada a um cabo de aço de 5 m, graduado de 0,5 em 0,5 m. Com a calibração obteve-se, para velocidade de propagação do som na água o valor de 1490 m/s. Este valor foi inserido no software Hydrobox Acquisition.

O tempo gasto na realização do levantamento foi de aproximadamente vinte e quatro horas. A excessiva quantidade de rede de pesca, que enrolavam na hélice do motor, contribuiu para um tempo maior.

Após o levantamento realizou-se o tratamento das linhas de sondagem com o auxílio do software Hypack, gerando assim um arquivo, denominado de GRID total, com 131 linhas regulares de sondagem espaçadas em 20 metros e 5 linhas de verificação espaçadas em 100 metros, contendo as coordenadas planimétricas de cada ponto das linhas e as suas respectivas profundidades medidas com a frequência 210 kHz.

Objetivando comparar eficiência dos interpoladores krigagem e Topo to Raster na presença de muitas e poucas linhas regulares de sondagem, o GRID total foi dividido em mais cinco amostras denominadas, conforme Figura 5.3: GRID 1, contendo 131 linhas regulares espaçadas em 20 metros, sem linhas de verificação; GRID 2, contendo 65 linhas regulares espaçadas em 40 metros; GRID 3, contendo 32 linhas regulares espaçadas em 80 metros; GRID 4, contendo 16 linhas regulares espaçadas em 160 metros, e GRID 5, contendo 9 linhas regulares espaçadas em 320 metros.

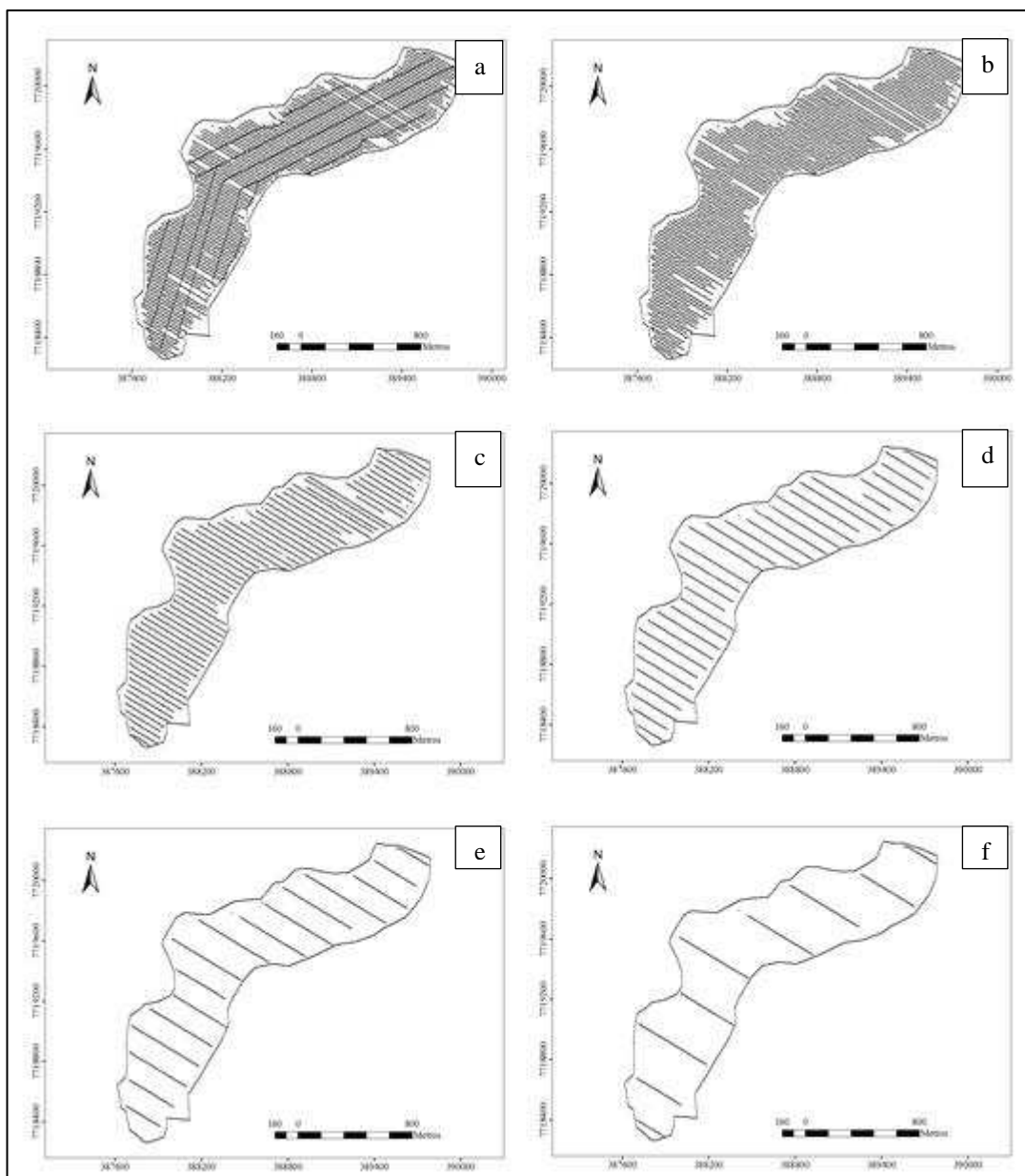


Figura 5.3 – Representação gráfica dos GRIDs amostrais das observações provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

A Figura 5.3-a, representa o GRID total e as Figuras 5.3-b, 5.3-c, 5.3-d, 5.3-e e 5.3-f representam os GRIDs 1, 2, 3, 4 e 5 com espaçamento entre as linhas regulares de 20, 40, 80, 160 e 320 metros, respectivamente.

As diferentes amostras de profundidades foram submetidas a análises exploratórias, onde pôde-se estimar a média das profundidades, variância, desvio-padrão, valor máximo, valor mínimo além de permitir detectar possíveis outliers (valores que apresentam

afastamento em relação aos demais, considerados valores “anormais” ou erros grosseiros) (GUIMARÃES, 2004; VILELA, 2004).

Em seguida, as profundidades foram interpoladas utilizando os métodos krigagem e Topo to Raster para a geração dos MDEs.

Antes da interpolação utilizando krigagem deve ser realizada uma análise geoestatística com o objetivo de verificar a existência, e quantificar o grau, de dependência espacial da variável através do ajuste de modelos teóricos aos semivariogramas experimentais (SANTOS, et al 2011).

Caso seja constatada a presença de dependência espacial entre os dados, pode-se aplicar o método de krigagem para prever a variável em estudo nos locais não amostrados a partir dos dados medidos.

A interpolação por Topo to Raster foi feita utilizando como arquivo de entrada somente arquivos de pontos. Este processo foi realizado assim pelo fato de a interpolação por krigagem ser feita somente com pontos e desta forma pode-se analisar os interpoladores nas mesmas condições.

A classificação foi feita a partir de uma análise das isobatimétricas geradas para cada espaçamento utilizado e uma análise estatística das discrepâncias, d_i , entre os valores preditos e observados nas linhas de verificação Equação 5.6. Para essa análise foram calculados a média das discrepâncias (\bar{d}), o desvio padrão da amostra de discrepâncias (S_d) e a raiz da média dos quadrados das discrepâncias (RMS_d) a partir das Equações 5.7, 5.8 e 5.9, respectivamente:

$$d_i = Z_{est}(l_i) - Z_{iobs} \quad , \quad (5.6)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{nd} d_i}{nd} \quad , \quad (5.7)$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (d_i - \bar{d})^2}{nd - 1}}, \quad (5.8)$$

$$RMS_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (d_i)^2}{nd - 1}}, \quad (5.9)$$

sendo:

$Z_{i(\text{bat})}$: valor estimado para a profundidade na posição i , extraído do MDE;

$Z_{i(\text{top})}$: valor observado para a profundidade na posição i , com o levantamento topográfico;

nd : números de discrepâncias na amostra;

5.5 Resultados

Na análise exploratória das profundidades medidas, com ecobatímetro monofeixe, frequência 210 khz, chegou-se aos resultados da Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados da análise exploratória das diferentes amostras de profundidades medidas com ecobatímetro monofeixe e frequência 210 khz.

	GRID total	GRID 1	GRID 2	GRID 3	GRID 4	GRID 5
Média (m)	4,67	4,63	4,28	3,73	2,95	2,07
Mediana (m)	4,97	4,96	4,81	4,54	3,57	0,00
Variância (m ²)	3,30	3,68	4,78	6,25	7,22	7,51
Desvio Padrão (m)	1,82	1,92	2,19	2,50	2,69	2,55

	GRID total	GRID 1	GRID 2	GRID 3	GRID 4	GRID 5
Máxima (m)	10,57	10,57	10,57	10,57	10,57	10,57
Mínima (m)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Assimetria	-0,83	-0,86	-0,73	-0,40	0,11	0,64
Curtose	4,03	3,83	2,87	1,96	1,56	1,86

Percebe-se, que com a variação do espaçamento entre as seções (variação amostral) houve mudanças significativas do desvio padrão, média e variância, o que desfavorecerá a interpolação.

Na análise geoestatística feita a partir do semivariograma experimental foi detectada a existência de dependência espacial nos dados dos GRIDs 1, 2, 3, 4 e 5 Figura 5.4. O modelo teórico que melhor se ajustou ao semivariograma experimental foi o exponencial.

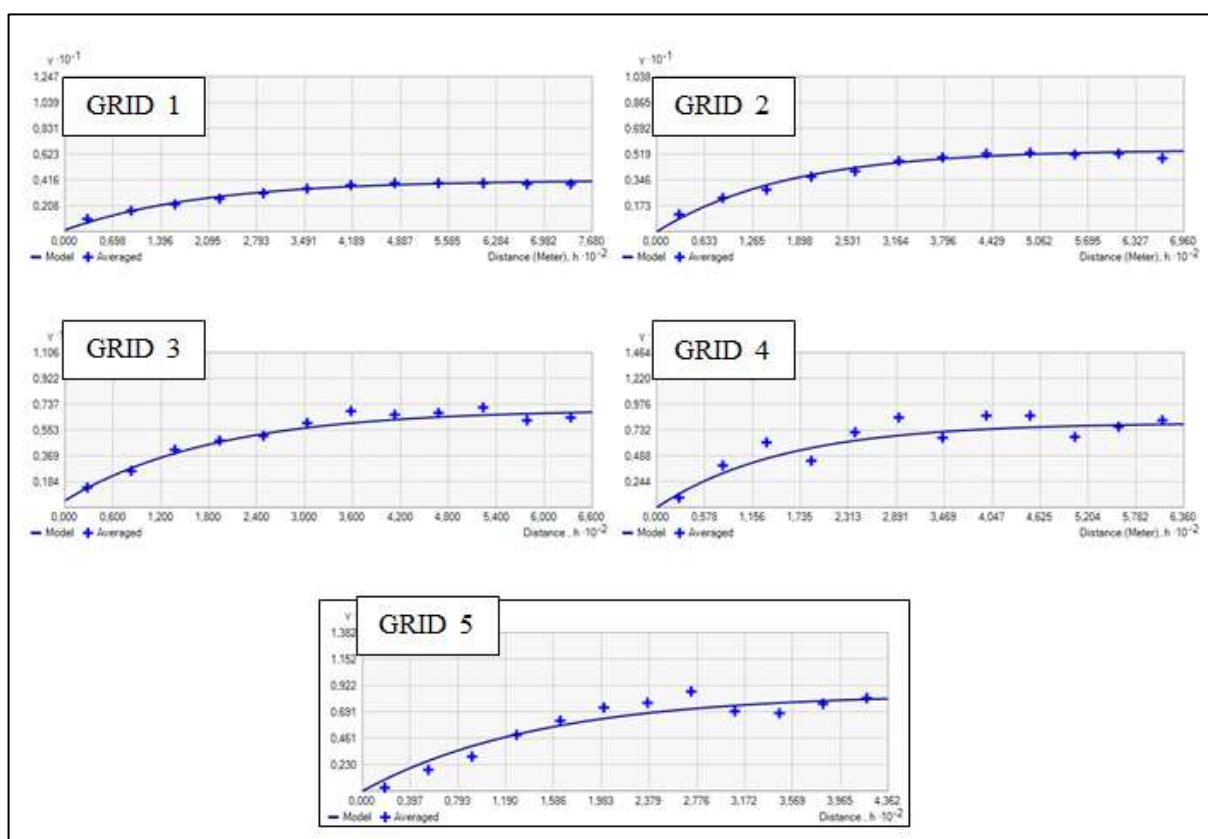


Figura 5.4 – Representação gráfica dos Semivariogramas Experimentais e modelo exponencial ajustado às semivariâncias estimadas para os GRIDs 1, 2, 3, 4 e 5 com espaçamento entre as linhas regulares de sondagem de 20, 40, 80, 160 e 320 metros, respectivamente.

Observa-se nos semivariogramas mostrados na Figura 5.4 em forma de gráfico o comportamento espacial da variável profundidade em estudo, em relação à distância. Nota-se que a variável apresentou padrões de dependência espacial para todos os GRIDs amostrais. No entanto para os GRIDs 4 e 5 foram encontradas dificuldades maiores para ajustar o modelo ao semivariograma experimental, conforme pode ser visto nos gráficos dos respectivos GRIDs na Figura 5.4. Fato este explicado pela distância entre as linhas regulares de sondagem de 160 e 320 metros.

Conforme sugere Schaffrath (2006), numa representação gráfica das semivariâncias, podem ser identificadas algumas estimativas dos parâmetros do modelo ajustado ao semivariograma experimental. Tais parâmetros são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros dos semivariogramas experimentais para os GRIDs 1, 2, 3, 4 e 5, considerando os espaçamentos entre as linhas regulares de sondagem de 20, 40, 80, 160 e 320 metros, respectivamente.

	GRID 1	GRID 2	GRID 3	GRID 4	GRID 5
Efeito Pepita (m)	0,60	0,00	0,50	0,00	0,00
Alcance (m)	700,00	520,00	565,00	460,00	440,00
Patamar (m)	3,30	5,50	6,50	8,00	8,50
Variância (m ²)	3,67	4,78	6,25	7,22	7,51

Nota-se na Tabela 5.3 que a variância vai aumentando com o aumento do espaçamento entre as linhas regulares de sondagem.

Após a verificação de dependência espacial nos dados, aplicou-se a krigagem ordinária e o Topo to Raster condicionado para prever a profundidade para locais não amostrados,

gerando-se então os MDEs e as respectivas isobatimétricas para os GRIDs 1, 2, 3, 4 e 5 conforme Figuras 5.5 a 5.14.

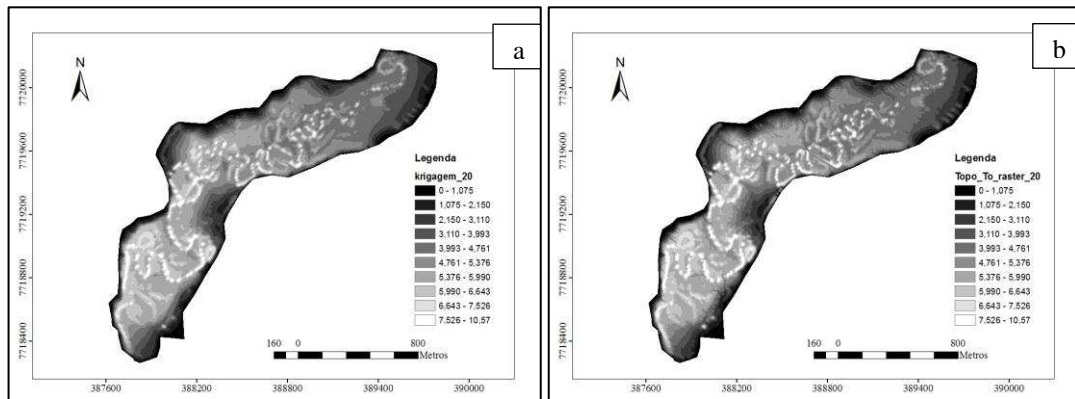


Figura 5.5 – MDEs gerados pela krigagem (Figura 5.5-a) e Topo to Raster condicionado (Figura 5.5-b) para o GRID 1 (espaçamento de linhas regulares de sondagem de 20 metros) dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

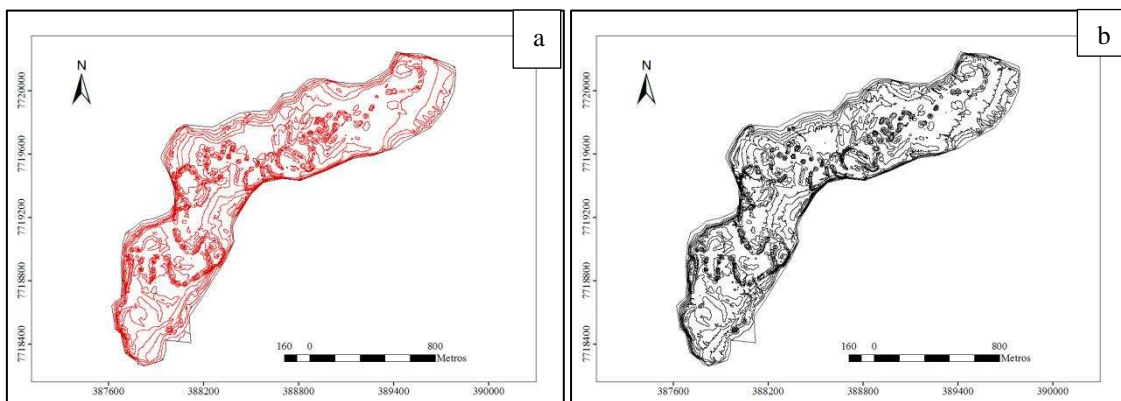


Figura 5.6 – Isobatimétricas geradas pelo método de krigagem, na cor vermelho (Figura 5.6-a) e pelo Topo to Raster, na cor preto (Figura 5.6-b). Espaçamento de linhas regulares de sondagem de 20 metros, dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

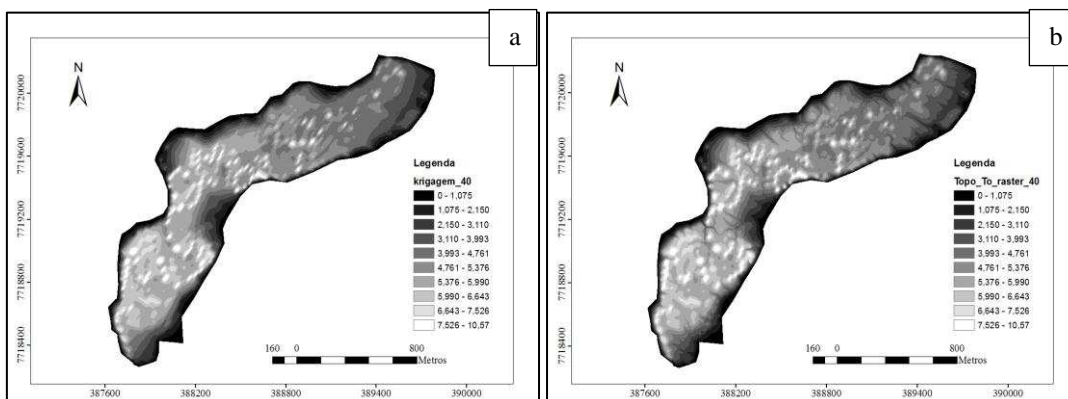


Figura 5.7 – MDEs gerados pela krigagem (Figura 5.7-a) e Topo To Raster (Figura 5.7-b) para o GRID 2 (espaçamento de linhas regulares de sondagem de 40 metros) dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

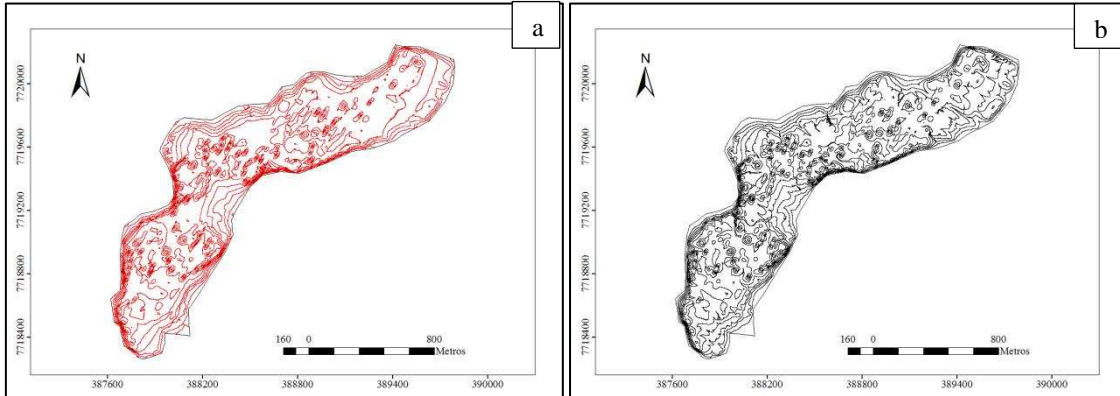


Figura 5.8 – Isobatimétricas geradas pelo método de krigagem, na cor vermelho (Figura 5.8-a) e pelo Topo to Raster, na cor preto (Figura 5.8-b). Espaçamento de linhas regulares de sondagem de 40 metros, dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

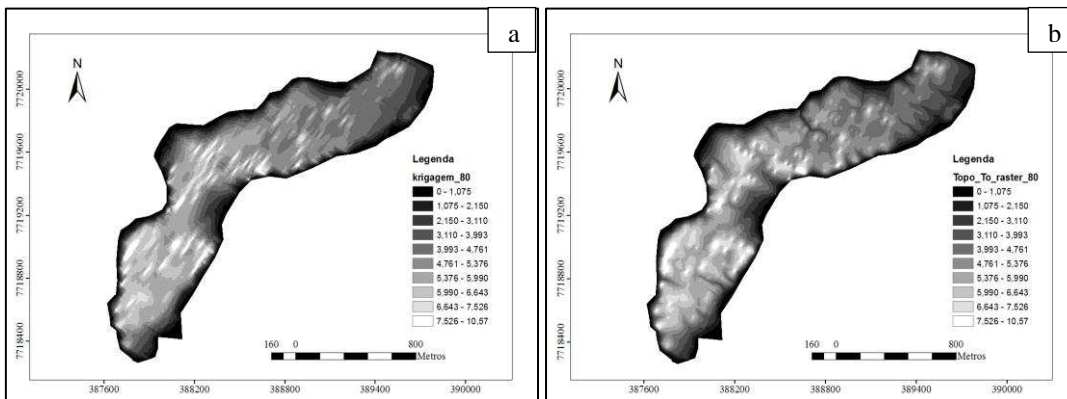


Figura 5.9 – MDEs gerados pela krigagem (Figura 5.9-a) e Topo to Raster (Figura 5.9-b) para o GRID 3 (espaçamento de linhas regulares de sondagem de 80 metros) dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

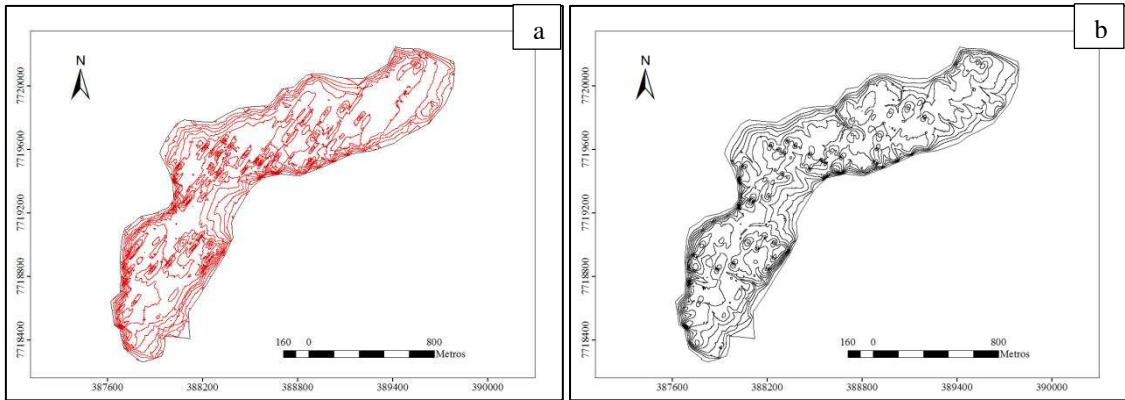


Figura 5.10 – Isobatimétricas geradas pelo método de krigagem, na cor vermelho (Figura 5.10-a) e pelo Topo to Raster, na cor preto (Figura 5.10-b). Espaçamento de linhas regulares de sondagem de 80 metros, dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

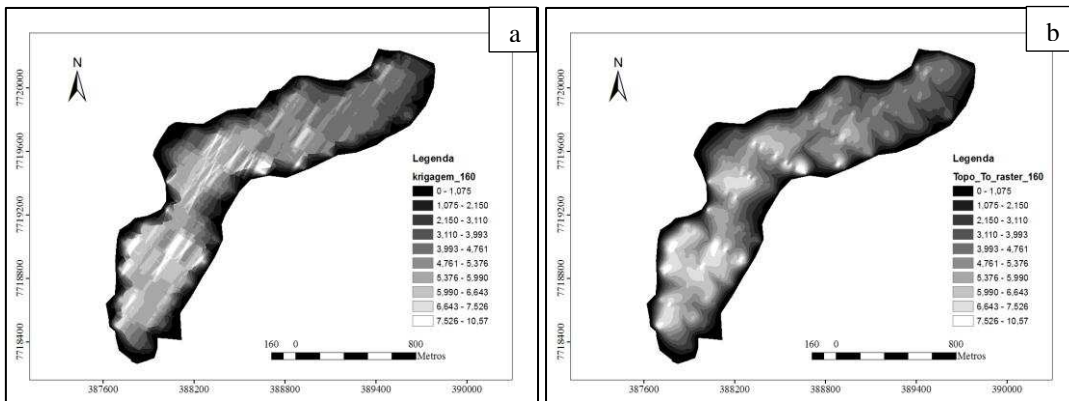


Figura 5.11 – MDEs gerados pela krigagem (Figura 5.11-a) e Topo to Raster (Figura 5.11-b) para o GRID 4 (espaçamento de linhas regulares de sondagem de 160 metros) dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

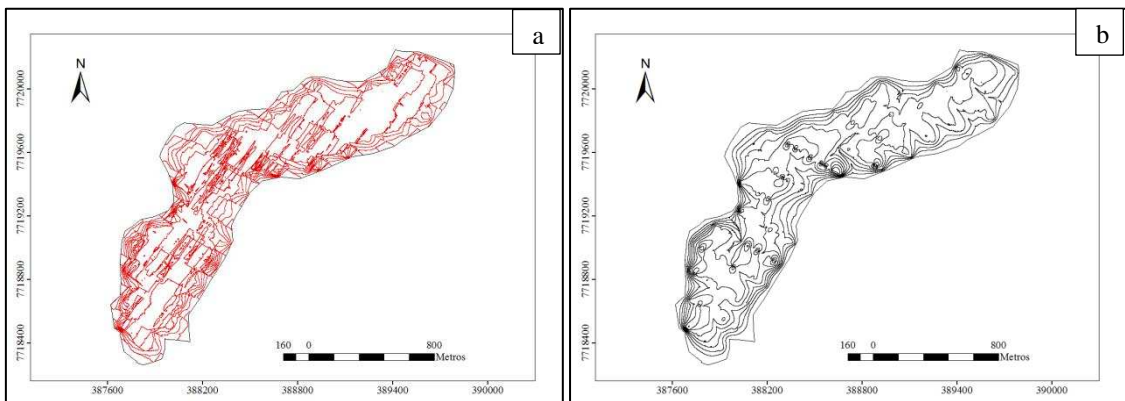


Figura 5.12 – Isobatimétricas geradas pelo método de krigagem, na cor vermelho (Figura 5.12-a) e pelo Topo to Raster, na cor preto (Figura 5.12-b). Espaçamento de linhas regulares

de sondagem de 160 metros, dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

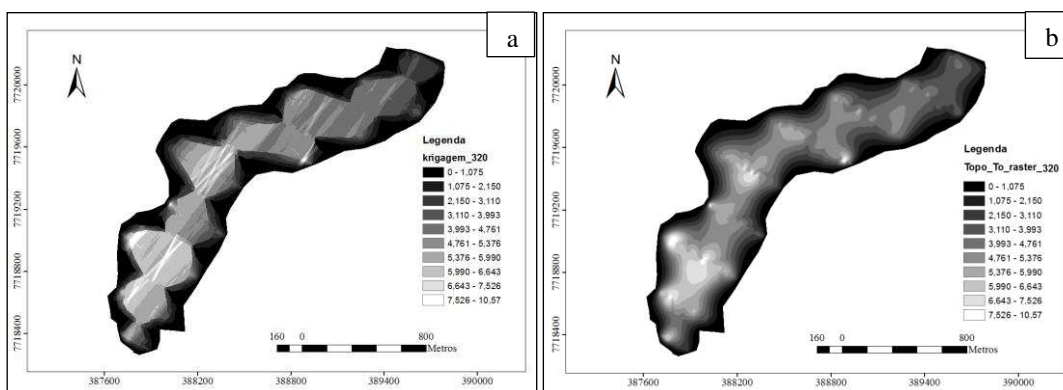


Figura 5.13 – MDEs gerados pela krigagem (Figura 5.13-a) e Topo to Raster (Figura 5.13-b) para o GRID 5 (espaçamento de linhas regulares de sondagem de 320 metros) dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

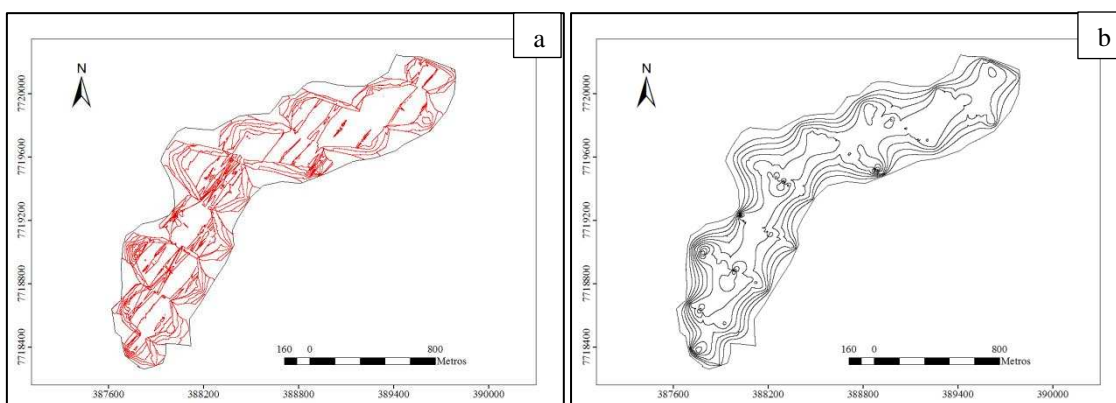


Figura 5.14 – Isobatimétricas geradas pelo método de krigagem, na cor vermelho (Figura 5.14-a) e pelo Topo to Raster, na cor preto (Figura 5.14-b). Espaçamento de linhas regulares de sondagem de 320 metros, dos dados provenientes do levantamento batimétrico da lagoa de Capitólio - MG.

Analisando a Figura 5.5 e 5.6 do GRID 1, verifica-se que as interpolações empregando krigagem e Topo to Raster não apresentaram diferenças significativas. Neste GRID, com espaçamento entre as linhas regulares de sondagem de 20 m, as interpolações mostram claramente o curso do rio antes do represamento. Nas Figuras 5.7 a 5.10, dos GRIDs 2 e 3, com espaçamento entre as linhas regulares de sondagem de 40 e 80 metros respectivamente, percebe-se algumas diferenças entre os interpoladores, krigagem e Topo to Raster. Já com os GRIDs 4 e 5, Figuras 5.11 a 5.14, o Topo to Raster quando comparada com a interpolação por

krigagem, apresentou uma melhor suavização no contorno. Desta forma espera-se que na análise estatística possa ser útil para indicar e classificar qual foi o melhor interpolador.

Para avaliação da acurácia dos MDEs gerados aplicando krigagem (K) e topo to raster (T), foi realizada análise estatística das discrepâncias entre as profundidades observadas nas linhas de verificação e as previstas pelos interpoladores, para os GRIDs 1, 2, 3, 4 e 5 com espaçamento de 20, 40, 80, 160 e 320 metros, respectivamente. Para isto foram calculados os índices estatísticos que se encontram na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Índices para análise estatística das discrepâncias entre profundidades observadas nas linhas de verificação e as previstas pelos interpoladores, para os GRIDs 1, 2, 3, 4 e 5.

	Média (m)	Sd (m)	RMS _d (m)
K_GRID 1	0,00	0,07	0,07
T_GRID 1	0,01	0,18	0,18
K_GRID 2	-0,02	0,58	0,58
T_GRID 2	-0,08	0,64	0,64
K_GRID 3	-0,14	0,87	0,88
T_GRID 3	-0,22	0,92	0,94
K_GRID 4	-0,44	1,44	1,50
T_GRID 4	-0,50	1,32	1,41
K_GRID 5	-1,25	2,07	2,42
T_GRID 5	-1,12	1,56	1,92

Ao analisar a Tabela 5.4, verifica-se que para os GRIDs 4 e 5 o Topo to Raster apresentou RMS_d ligeiramente melhor quando comparado com a krigagem, já para os GRIDs

1, 2 e 3 a krigagem propiciou melhor acurácia. Mostrando que para espaçamentos maiores á uma perda significativa na krigagem.

Conforme sugere Ferreira (2013), efetuou-se o cálculo do volume de água para todos os GRIDs, Tabela 5.5. Para a análise do volume, foi tomado como valor de comparação o volume encontrado a partir do interpolador krigagem para o GRID 1, com espaçamento entre linhas regulares de sondagem de 20 metros.

Tabela 5.5 – Volumes e diferenças de volumes de água da lagoa de Capitólio – MG, encontrados a partir dos interpoladores krigagem e Topo to Raster com linhas regulares de sondagem espaçadas em 20, 40, 80, 160 e 320 metros.

Método	Espaçamento (m)	Volume (m ³)	Diferença (k-T) (m ³)	%
K	20	6 461 844	41 602	0,64
T		6 420 242		
K	40	6 331 370	76 100	1,20
T		6 255 270		
K	80	6 102 222	76 978	1,26
T		6 025 244		
K	160	5 615 860	13 452	0,24
T		5 602 407		
K	320	4 584 340	-222 983	4,86
T		4 807 324		

Verifica-se na Tabela 5.5 que as diferenças entre os volumes encontrados empregando os interpoladores krigagem e Topo to Raster foram crescentes, respectivamente, para os GRIDs 1, 2 e 3 com os respectivos espaçamentos entre as linhas regulares de sondagem de 20, 40 e 80 metros. Tais valores foram; 41 602 m³, 76 100 m³ e 76 978 m³ respectivamente. Já para os GRIDs 4 e 5 observa-se que as diferenças começaram a decrescer, apresentando os valores de 13 452 m³ para o GRID 4 e de 222 983 m³ negativo. Isto pode ser explicado pelas melhores estimativas feitas pelo interpolador Topo to Raster para espaçamentos maiores.

Quando se considera a krigagem para GRID 1 como interpolação mais acurada, fato justificado pela Tabela 5.5, ao aplicar a krigagem para os GRIDs 2, 3, 4 e 5, encontra-se os seguintes valores de discrepâncias para o volume, respectivamente: 130 474 m³ (2,02%), 359 622 m³ (5,57%), 845 984 m³ (13,09%) e 1 877 504 m³ (29,06%). Enquanto para os volumes aplicando o Topo to Raster para os GRIDs 2, 3, 4 e 5, encontra-se os seguintes valores de discrepâncias para o volume, respectivamente: 206 574 m³ (3,20%), 436 600 m³ (6,76%), 859 437 m³ (13,30%) e 1 654 520 m³ (25,60%).

5.6 Conclusão

Em levantamentos batimétricos empregando ecobatímetros monofeixe as profundidades são medidas em linhas regulares de sondagem e as superfícies submersas não são amostradas continuamente. A utilização de interpoladores é indispensável para representar uniformemente os espaços não amostrados. Determinar o espaçamento ideal entre as linhas de sondagem não é uma tarefa trivial.

O melhor interpolador é aquele que mesmo com um espaçamento maior consegue prever a profundidade com melhor precisão. Esta avaliação foi feita a partir de análises visuais dos MDEs e de índices estatísticos que auxiliam na escolha do melhor interpolador.

Com este estudo pode-se verificar através da análise dos índices estatísticos das discrepâncias entre as profundidades estimadas pelos interpoladores e as profundidades observadas nas linhas de verificação do levantamento batimétrico, que a krigagem apresentou melhores resultados para os GRIDs 1, 2 e 3, espaçamentos de 20, 40 e 80 metros entre as linhas regulares.

Sendo assim, considerando a área em estudo, conclui-se que para espaçamentos entre linhas regulares de sondagem menores de 80 metros, pode-se utilizar interpolador krigagem. Já para os GRIDs 4 e 5 com espaçamento entre linhas regulares de sondagem de 160 e 320 metros, o interpolador Topo to Raster apresentou uma inversão de valores na análise estatística, mostrando ser melhor para espaçamento entre linhas regulares de sondagem maiores.

Com os valores encontrados para os volumes verifica-se um aumento gradativo nas diferenças entre os volumes quando o espaçamento entre linhas regulares de sondagem aumenta de 20 a 80 metros e esta diferença decresce a partir de 160 e 320 metros. A diferença

nos volumes, determinados com espaçamentos 20 e 40 metros entre as linhas regulares de sondagem, para a lagoa em estudo, foi menor que 3%.

Analisando as isobatimétricas dos diversos MDEs criados, observa-se que para espaçamentos maiores que 80 metros o interpolador Topo to Raster apresentou feições mais suavizadas quando comparado com os MDEs gerados pela krigagem.

Para um nível de detalhamento da superfície submersa confiável não recomenda-se espaçamentos entre linhas regulares de sondagem maiores que 40 metros. Se considerarmos o tempo gasto no levantamento de campo de 24 horas, a utilização de espaçamentos entre linhas regulares de sondagem de 40 metros levaria economia em tempo de 12 horas de serviço de campo.

Agradecimentos:

Ao Departamento de Engenharia Civil - Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Viçosa – UFV pelo apoio a esta pesquisa.

6 CONCLUSÕES GERAIS

Mesmo com a evolução tecnológica nos últimos anos, com o surgimento de sensores acústicos (ecobatímetro multifeixe) capazes de realizar uma amostragem completa do fundo submerso, os ecobatímetros monofeixe, que deixam áreas não amostradas, ainda são os equipamentos mais utilizados em todo o mundo. Devido ao valor de mercado destes equipamentos, a robustez e facilidade de operação.

Sendo assim, em levantamentos batimétricos utilizando ecobatímetro monofeixe, a utilização de interpoladores é indispensável para gerar uma representação contínua da superfície submersa. Vários nomes são dados a estas representações; no Brasil o termo mais utilizado é Modelo Digital de Elevação (MDE).

Na literatura existe uma gama de métodos de interpolação, que podem ser usados, entre eles os mais citados são os métodos: krigagem, inverso ponderado da distância e Topo to Raster.

Com os resultados encontrados no capítulo 2, foram avaliados os interpoladores krigagem e Topo to Raster na geração de modelos digitais de elevação a partir de levantamento topográfico em uma caixa de decantação, comparando-os com o modelo de elevação gerado por Rede de Triângulos Irregulares – TIN. Na análise estatística não verificou-se diferença entre os interpoladores KO e KS e entre Topo to Raster padrão e condicionado. Analisando as isobatimétricas, verificou-se que o interpolador Topo to Raster condicionado apresentou notáveis deformações nas bordas e no centro da área de estudo, devendo ser descartado. Em relação ao modelo TIN os interpoladores Krigagem e topo to raster apresentaram uma acurácia de 3 cm.

No capítulo 3, foi avaliada a acurácia do MDE do levantamento batimétrico monofeixe em uma caixa de decantação, tomando como referência os pontos determinados pelo levantamento topográfico. Nesta avaliação, a quantidade de pontos de referência, bem como a distribuição deles foram analisadas. Optou-se por utilizar todos os 96 pontos determinados pelo levantamento topográfico. A acurácia encontrada para os MDEs gerados a partir do levantamento batimétrico monofeixe foi em torno 5 cm, sendo a profundidade média da caixa de 3,21 m.

No capítulo 4, foi avaliado do uso de ecobatímetro na determinação do volume de lama em caixas de decantação de estação de tratamento de água. Os resultados mostraram que para determinação do volume de lama em caixas de decantação de estações de tratamento de água,

utilizando o ecobatímetro monofeixe dupla frequência (33 kHz e 210 kHz), deve-se, inicialmente, confeccionar a planta “as built” da caixa, por topografia com a caixa vazia ou com ecobatímetro, com a água limpa.

No capítulo 5, considerando a comparação entre os diversos MDEs criados com diferentes espaçamentos entre linhas regulares de sondagem, conclui-se que a diferença entre os volumes calculados com espaçamentos de 20 e 40 metros foi menor que 3% e que para espaçamentos maiores o interpolador Topo to Raster apresentou feições mais suavizadas quando comparado com os MDEs gerados pela krigagem.

Com relação ao espaçamento entre as seções, conclui-se que este é um fator relevante a considerar quando se quer resultados acurados. Fato este comprovado pelos valores encontrados para os índices estatísticos e pelos volumes, onde se verifica que os valores encontrados apresentam diferenças cada vez maiores à medida que o espaçamento entre seções aumenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Eliane Cristina et al. **Avaliação da qualidade da água da bacia do rio Pirapó–Maringá, Estado do Paraná, por meio de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos-DOI: 10.4025/actascitechnol. v30i1. 3199.** Acta Scientiarum. Technology, v. 30, n. 1, p. 39-48, 2008.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Orientação para atualização das curvas cota x área x volume.** Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. Brasília: ANA, SGH, 2011.

ANDRIOTTI, J. L. S., **Introdução à Geoestatística.** Acta Geologica Leopoldensia, 11 (27): 5-81.

ARBIA, G., GRIFFITH, D., and HAINING, R. **Error propagation modelling in raster GIS: overlay operations.** International Journal of Geographical Information Science, 12, pp. 145-165. 1998.

ARONOFF, S. **Geographics information systems: A management perspective.** WDL Publications. Otawwa – Canadá. 1995.

ATKINSON, A.; ARIZA, F.J. **Nuevo enfoque para el análisis de la calidad posicional em cartografia mediante estudos basado em la geometria lineal.** In: Anais do XIV Congresso Internacional de Engenharia Gráfica, Santander, Espanha. 2002.

BERLAMONT, J. et al. **The characterisation of cohesive sediment properties.** Coastal Engineering, 1993, v. 21, n. 1, p. 105-128.

BLANTON, J. O. **Procedures for Monitoring Reservoir Sedimentation:** Technical Guideline for Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Oct. 1982.

BURROUGH, P. A.; MCDONEEL, R. **Priciples of Geographical Information Systems.** Spatial information systems and geostatistics. New York: Oxford University Press, 333 p. 1998.

CAMARGO, E. C. G. **Geoestatística: Fundamentos e aplicações. Geoprocessamento para projetos ambientais.** São José dos Campos: INPE, 1998.

CARVALHO, N. O. et al. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatório.** Brasília, DF: ANEEL, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

CARVALHO, Q. V. **Estudo da Dispersão de Metais Pesados na Envolvente de uma Central Termoelétrica a Carvão.** Dissertação (Mestrado). Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente – Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

CHAVES, M. A. **Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes para a Bacia Amazônia.** Tese (Doutorado). Universidade de Viçosa – UFV. 2002. 132 p.

COPAS, J.; EGUCHI, S. **Local sensitivity approximations for selectivity bias.** Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), v. 63, n. 4, p. 871-895, 2001.

DELFINER, P.; DELHOMME, J. P. **Optimum interpolation by kriging.** 1975.

Duxbury, A. C; Duxbury, A.B, **An Introduction to Oceanos do Mundo** (3^a ed.): Wm.C. Brown Publishers, Dubuque, Iowa, 446 p, 1991.

FARACO, M. A. et al. **Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja.** Revista Brasileira de Ciências do Solo, v. 32, n. 2, p.463-476, 2008.

FERRARI, R. L. **Reconnaissance Techniques for Reservoir Surveys.** Denver, Colorado, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Apr. 2006.

FERREIRA, I. O. **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos visando a representação computacional do relevo submerso utilizando interpoladores determinísticos e probabilísticos.** Dissertação (Mestrado). UFV. Universidade Federal de Viçosa. CAMPUS DE VIÇOSA. 2013.

FERREIRA, I. O; RODRIGUES, D.D; DOS SANTOS, A. de P. **Levantamento batimétrico automatizado aplicado à gestão de recursos hídricos. Estudo de caso:**

Represamento do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa–Mg. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 4., 2012, Recife. Anais... Recife: s.n., 2012. p.1-8.

FONTEIN W & VAN DER WAL J. 2006. **Assessing Nautical Depth Efficiently in Terms of Rheological Characteristics.** In: Proceedings of the International Hydrographic Conference Evolutions in Hydrography, Hydro06. Antwerp, Belgium. Disponível em: <http://www.stema-systems.nl/uploads/paginaafbeeldingen/Nauticaldepth_Stema_hydro06.pdf>. Acesso em: 20 JAN. 2014.

GALO, M.; CAMARGO, P. de O. **O uso do GPS no controle de qualidade de cartas.** In: 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II, p. 41-48, Florianópolis – Brasil. 1994.

GUEDES, H. A. S. et al. **Análise da precisão entre os métodos de interpolação Krigagem Ordinária e Topo to Raster na geração de modelos digitais de elevação.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.4239.

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

HOLLAND, T. K, VINZON S. B & CALLIARI L. J. 2009. **A field study of coastal dynamics on a muddy coast offshore of Cassino beach, Brazil.** Continental Shelf Research v. 29, n. 3, p. 503-514, 2009.

HUTCHINSON, M. F. **A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits.** Journal of Hydrology, v. 106, p. 211-232, 1989.

HUTCHINSON, M. F. **Calculation of hydrologically sound digital elevation models.** Proceedings, Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney, Columbus: International Geographical Union, p. 117-133. 1988.

HUTCHINSON, M. F. **Locally adaptive gridding of noisy high resolution topographic data.** XVIII Congresso Mundial IMACS e MODSIM09 Congresso Internacional sobre Modelagem e Simulação. Cairns, Austrália 13-17 Julho de 2009.

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

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

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

ISAAKS, E. H.; SRISVASTAVA, R.M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 561 p. 1998.

KAMIMURA, K. M. et al. **Load bearing capacity of a Red-Yellow Latosol in a coffee plantation**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, n. 5, p. 1457-1465, 2012.

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, v. 2, p. 20, 2000.

LANDIM, P. M. B.; MONTEIRO, R. C.; CORSI, A. C. **Introdução à confecção de mapas pelo software SURFER**. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Laboratório Geomatemática, Texto Didático 08, 21 p. 2002.

LANDIM, P. M. B; STURARO, J.R; MONTEIRO, R.C. **Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada**. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, 2002.

LEKKERKERK, Huibert-Jan. **Handbook of offshore surveying**. Clarkson Research Services Ltd., 2006.

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

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Ecole nationale supérieure des mines de Paris, 1971.

MEDWIN, H.; CLAY, C. S. **Fundamentals of Acoustical Oceanography Academic**. San Diego, p. 594-595, 1998.

MEHTA A & DYER K. 1990. **Cohesive sediment transport in estuarine and coastal waters**. In: LE MEHAUTE B & HANES DM (Eds.). *The sea: ideas and observations on progress in the study of the seas*. New York, Wiley-Interscience, 9, Part B, p. 815–839.

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

Metzger, E. P. **Submarine Mountains Teachers Guide**. 1999. Disponível em: <www.ucmp.berkeley.edu/fosrec/Metzger2.html>. Acesso em: 19 jan. 2014.

MONICO, J. F. M.; DAL PÓZ, A.P.; GALO, M.; SANTOS, M.C.; OLIVEIRA, L.C. **Acurácia e Precisão: Revendo os conceitos de forma acurada**. Bol. Ciênc. Geod., séc. Comunicações, Curitiba, vol. 15, nº 3, p.469-483, jul-set, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUGER, G.C., **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução Verônica Calado. – 2. Reimpr. – Rio de Janeiro: LTC, 2008.

NETO, A. A. **Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina**. Brazilian Journal of Geophysics, v. 18, n. 3, p. 241-256, 2000.

NOGUEIRA, J. D. L. de; AMARAL, R. F. do. **Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros-RN**. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 4117-4123, 2009.

OLIVEIRA, A. H. et al. **Consistência hidrológica de Modelos Digitais de Elevação (MDE) para definição da rede de drenagem na sub-bacia do horto florestal terra dura, Eldorado do Sul, RS**. Revista Brasileira de Ciências do Solo. VI. p.1259-1267. 2012.

PAES, A. T. **Desvio padrão ou erro padrão: qual utilizar?** Por dentro da estatística. Revista Einstein: Educ Contin Saúde. 2008.

PANOSSO, A. R.; MALHEIROS, E. B. **Estatística experimental aplicada – software**
r. Apostila. Retirado de:

http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/215/ApostilaEEAR_Cap1-1.pdf.

Acessado em 17 de janeiro de 2014.

PETTINATI, F. **Modelamento digital de terreno e representação gráfica de superfície**. (Dissertação de Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade da Universidade de São Paulo – USP.1983. 177p.

PINTO, S. **Um Sistema de Representação de Relevos**. Dissertação (Mestrado). DCC/ICEX/UFMG, Belo Horizonte, 1994, 64 p.

QUARESMA, V. da S. et al. **Utilização de métodos geofísicos para mapeamento de lama fluida no porto de tubarão, vitória (ES-Brasil)**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 29, n. 3, 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.

SANTOS, N. T. **Notas de Aulas de Estatística Espacial**. Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2009.

SANTOS, A. P. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais com uso de estatística espacial**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2010.

SANTOS, A. P.; OLIVEIRA, L. F.; GUIMARÃES, W. D.; VIEIRA, C.A.O. **Avaliação da acurácia planimétrica de imagens Ikonos ortorretificadas com diferentes MDEs**. In Congresso Brasileiro de Cartografia, XXIV, 2010, Aracaju, Sergipe. Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Cartografia, 2010.

SANTOS, G. R., et al. **KRIGAGEM SIMPLES versus KRIGAGEM UNIVERSAL: QUAL O PREDITOR MAIS PRECISO?** Energia na Agricultura, v. 26, n. 2, 2011.

SCHAFFRATH, V. R. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo e de variáveis de plantas daninhas em sistemas de manejo de solo**. Tese (Doutorado) - Maringá, Universidade Estadual do Paraná, 2006. 91p.

SCHETTINI, C. A. F, et al. 2010. **A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil.** *Geo-Marine Letters*. v. 30, n. 1, p. 47-62, 2010.

SILVEIRA, T. A. **Modelos de interpoladores aplicados a construção de superfície batimétrica.** Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, p. 73. 2010.

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.** 2007. 121p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, UFF, Niterói, 2007.

SOARES, A. **Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente.** 2ª Edição, IST Press. Lisboa. 2006.

SOUZA, A. V. de. **Análise dos parâmetros que compõem a equação da incerteza vertical propagada da profundidade reduzida.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná. 2011. 10p.

SOUZA, L. A. P. et al. **Página inicial do IPT> Centros Tecnológicos> Centro de Tecnologias Ambientais e Energéticas> Artigos Técnicos.** CEP, v. 5508, p. 901. Disponível em: <http://www.sbgf.org.br/publicacoes/boletins/boletim2_2008.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2014.

TOBLER, W. R. **A computer movie simulating urban growth in the Detroit region.** *Economic Geography*. 46(2): p. 234-240. 1970.

TORNAN, V. B. L.; BIRCK, A. R.; RIBOLDI, J. **Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Cramer-von Mises e Shapiro-Wilk por simulação.** In: 11 Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica (SEAGRO), 2005. Anais da 50ª RBRAS e do 11 SEAGRO. 2005.

USACE – U. S. Army Corps of Engineers. **Engineering and Desing. SEDIMENTATION INVESTIGATION OF RIVERS AND RESERVOIRS.** Engineer Manual No 1110-2-4000. Department of the Army. Washington, D. C., 15 Dec. 1989.

VIEIRA, S. R. et al. **Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties.** Hilgardia, Berkeley, v. 51, n.3, p1-75, 1983.

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.

WMO – WORD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on Sediment Management and Measurement.** Operational Hydrology Report n°. 47. Geneva, Switzerland, Secretariat of the World Meteorological Organization, 2003.

WONG, D. W. S., LEE, J. **Statistical analysis of geographic information with ArcView GIS and ArcGis.** Editora John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2005.

YAMAMOTO, J. K; CONDE, R. P. **Classificação de Recursos Minerais Usando a Variância de Interpolação.** Brazilian Journal of Geology, v. 29, n. 3, p. 349-356, 1999.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. **Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos.** Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology, v. 13, n. 1, p. 53-64, 2009.