

Paulo Henrique Praça de França

**Avaliação Comparativa de Métodos e Técnicas
Batimétricas na Obtenção das Curvas Cota X
Área X Volume de Reservatórios em Usinas
Hidrelétricas**

Brasília

2019

Paulo Henrique Praça de França

**Avaliação Comparativa de Métodos e Técnicas
Batimétricas na Obtenção das Curvas Cota X Área X
Volume de Reservatórios em Usinas Hidrelétricas**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica.

Universidade de Brasília – UnB

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

Orientador: Dr. Marco Ianniruberto

Brasília

2019

Paulo Henrique Praça de França

Avaliação Comparativa de Métodos e Técnicas Batimétricas na Obtenção das Curvas Cota X Área X Volume de Reservatórios em Usinas Hidrelétricas/ Paulo Henrique Praça de França. – Brasília, 2019-

102p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Marco Ianniruberto

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília – UnB

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, 2019.

1. Batimetria. 2. Reservatório. 3. Modelo Digital de Terreno. I. Ianniruberto, Marco. II. Universidade de Brasília. III. Instituto de Geociências. IV. Título

Paulo Henrique Praça de França

**Avaliação Comparativa de Métodos e Técnicas
Batimétricas na Obtenção das Curvas Cota X Área X
Volume de Reservatórios em Usinas Hidrelétricas**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica.

Trabalho aprovado. Brasília, 22 de março de 2019:

Prof. Dr. Marco Ianniruberto
Universidade de Brasília
Orientador

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig
Universidade de Brasília
Membro Interno

Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad
Universidade de São Paulo
Membro Externo

Brasília
2019

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constantes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Marco Ianniruberto pela orientação e confiança.

Ao Professor Welitom Rodrigues pelos conselhos e ajuda desde da época da graduação em geofísica.

Ao Fabio de Novaes e sua empresa Rural Tech Comércio e Serviços Eirelli por viabilizar este trabalho, fornecendo equipamentos, dados e todas ferramentas necessárias.

À Universidade de Brasília, pelos conhecimentos adquiridos e infraestrutura disponibilizada.

À minha companheira, Bruna Pandolpho, pelas correções, todo apoio e compreensão.

Aos colegas da UnB, Eduardo Seimetz, Gabriela Turquetti e Pedro Vencovsky pelas correções e pelos tão necessários momentos de descontração.

À minha família que fizeram tudo por mim.

À todas as outras pessoas que direta ou indiretamente colaboraram com este trabalho.

"A felicidade só é real quando compartilhada."(Christopher McCandless)

RESUMO

Levantamentos batimétricos em reservatórios de usinas hidrelétricas têm como objetivo atualizar as estimativas de volume, servindo como base de dados para estimativas futuras da capacidade de armazenamento de água e das taxas de sedimentação. Considerado um processo caro e demorado, a batimetria, quando má planejada, pode embutir erros na modelagem do terreno em função do espaçamento de aquisição entre as seções topobatimétricas; conseqüentemente, levando a maiores erros nas respostas das curvas Cota x Área x Volume (CAVs) dos reservatórios. Sendo assim, a avaliação das técnicas atuais de aquisição batimétrica e dos métodos de interpolação, para uma melhor estimativa acerca dos volumes de reservatórios, se tornam importantes ferramentas no entendimento e gestão desses sistemas hídricos. Essa pesquisa tem como objetivo determinar de que forma levantamentos de dados com diferentes espaçamentos de aquisição e diferentes formas de interpolação influenciam no cálculo do volume de reservatórios. Os reservatórios utilizados nesse projeto são: UHE Chavantes; UHE Água Vermelha; UHE Capivara; UHE Irapé e UHE Rio das Pedras. Neste trabalho, foram extraídas seções transversais do mapa batimétrico gerado pela aquisição de dados de batimetria multifeixe, simulando uma aquisição de batimetria monofeixe com espaçamentos variados. Modelos Digitais de Terreno foram obtidos então, com o software ArcGis, a partir das metodologias de interpolação Topo to Raster e TIN. O volume de mínima normal foi calculado para cada MDT gerado e comparado com o volume do MDT da metodologia multifeixe. A partir dos volumes calculados foi possível realizar a regressão quadrática com qualidade de ajuste próximo a 100%. A regressão dos dados mostrou que quanto maior o espaçamento entre seções menor será o volume calculado. A subtração entre o MDT de maior espaçamento e o MDT de batimetria multifeixe, mostrou a diferença nos relevos e os erros presentes em cada interpolação. Com isso, regiões que apresentaram baixa complexidade de fundo (i.e. leito) não apresentaram variações significativas no volume estimado entre as técnicas batimétricas multifeixe e monofeixe, podendo ser aplicada a última metodologia, que é mais simples, de menor custo e resultado igualmente confiável na estimativa do cálculo de volume de reservatórios. No entanto, reservatórios com alta complexidade de fundo, apresentaram erros significativos na geração das curvas CAVs com o aumento da equidistância das seções. Dentre os interpoladores analisados, o *Topo to Raster* apresentou menor valor de RMS, portanto, os resultados mais confiáveis no cálculo de volume, principalmente, quando adicionada as linhas de drenagem à interpolação, representando o fundo dos reservatórios de forma mais acurada. Com relação às técnicas de aquisição, a resposta do volume é subestimada pela técnica monofeixe quando comparada com a técnica multifeixe. Esse resultado é função, principalmente, da abertura angular dos feixes (maior na técnica monofeixe) e da velocidade do som na água que, em geral, não é adquirida quando em levantamentos batimétricos monofeixe.

Palavras-chave: Interpolação. Batimetria. Reservatório. Modelo Digital de Terreno.

ABSTRACT

Bathymetric surveys in water reservoirs aim to update the volume estimates, serving as a database for future estimates of water storage capacity and sedimentation rates. Considered an expensive and time-consuming process, the bathymetry, when badly planned, can embed errors in the terrain modeling as a function of the acquisition spacing between the topobathymetric sections; consequently, leading to larger errors in the responses to the elevation-area-volume curves of the reservoirs. Therefore, the evaluation of current techniques of bathymetric surveys and interpolation methods, for a better estimation of reservoir volumes, become important tools for the understanding and management of these water systems. This work aims to determine how data surveys with different acquisition spacing and different forms of interpolation influence the calculation of the reservoir volume. The reservoirs used in this project are: HPP Chavantes; HPP Água Vermelha; HPP Capivara; HPP Irapé and HPP Rio das Pedras. In this work, cross sections were extracted from the bathymetric map generated by the multibeam survey, simulating a singlebeam survey with varied spacings. Digital Terrain Models were then obtained, using ArcGis software, from Topo to Raster and TIN interpolation methodologies. The minimum volume was calculated for each DTM generated and compared to the DTM volume of the multibeam methodology. From the calculated volumes it was possible to perform quadratic regression with adjustment quality close to 100%. The regression of the data showed that the larger the spacing between sections, the smaller the calculated volume. The subtraction between the DTM of greater spacing and the DTM of multibeam bathymetry showed the difference in the reliefs and the errors presented in each interpolation. Thus, regions that presented low terrain complexity didn't present significant variations in the estimated volume between multibeam and singlebeam bathymetric techniques, and that the last methodology, which is simpler and of lower cost has equally reliable results in the estimation of the volume calculation. However, reservoirs with high terrain complexity presented significant errors in the generation of elevation-area-volume curves with increasing equidistance of the sections. Among the interpolators analyzed, the Topo to Raster presented lower RMS value, therefore, the more reliable results in the volume calculation, especially when the drainage lines were added to the interpolation, representing the bottom of the reservoirs more accurately. Regarding the survey techniques, the volume response is underestimated by the singlebeam technique when compared to the multibeam technique. This result is mainly a function of the angular aperture of beams (higher in the singlebeam technique) and the velocity of sound in the water, which is not usually acquired during singlebeam bathymetric surveys.

Keywords: Interpolation. Bathymetry. Reservoir. Digital Terrain Model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Propagação de frente de onda esférica	31
Figura 2 – Onda acústica se propagando no meio	32
Figura 3 – O ecobatímetro monofeixe emite um feixe diretamente abaixo da embarcação	34
Figura 4 – Mapa batimétrico multifeixe de alta resolução	35
Figura 5 – Funcionamento do ecobatímetro multifeixe demonstrando o (<i>swath</i>)	35
Figura 6 – Incerteza devido à abertura angular do feixe e à mudança abrupta do relevo submerso.	37
Figura 7 – Incerteza devido ao balanço da embarcação.	37
Figura 8 – (A) Interpolação pelo método <i>TIN</i> , em que essa não apresenta continuidade do canal submerso. (B) Seções geradas artificialmente entre as seções obtidas em campo. (C) Interpolação através do método <i>Self-Similar Interpolation</i> , representando o canal devidamente.	39
Figura 9 – Aplicação dos interpoladores <i>Self-Similar</i> e <i>Anisotropic Elliptical Inverse Distance Weighted</i> , A) linhas de contorno batimétricas sem a inserção de pontos interpolados, B) pontos de aquisição (preto) e pontos gerados por meio da <i>Self-Similar Interpolation</i> (vermelho), C) linhas de contorno geradas por meio da <i>Self-Similar Interpolation</i> , D) pontos de aquisição (preto) e pontos gerados por meio da <i>Anisotropic Elliptical Inverse Distance Weighted</i> , E) linhas de contorno geradas por meio da <i>Anisotropic Elliptical Inverse Distance Weighted</i>	40
Figura 10 – Detalhes do modelo digital de terreno e TIN gerados para o reservatório de Bariri – SP entre duas seções batimétricas	41
Figura 11 – Gráfico Cota x Área x Volume	42
Figura 12 – (A) Valores positivos indicam que a superfície é convexa em determinado ponto. (B) Valores negativos indica que a superfície é côncava. (C) Um valor zero indica que a superfície é linear.	45
Figura 13 – Uma grade de <i>raster</i> que mostra um sistema de numeração para células na janela móvel de análise, onde Z é o valor da varredura. A célula central é a origem do sistema de coordenadas local (x, y) e as posições em relação a isso são denotados por subscritos. Para simplificar a notação, usou-se $N = \frac{(n-1)}{2}$ para qualquer $n \times n$ de janela onde n pode ser qualquer inteiro ímpar menor que o número de células de menor lado do <i>raster</i> . Estes são mostrados na íntegra para uma janela 3 x 3. Valores maiores de n significam que mais células são considerados na análise.	46

Figura 14 – Mapa de localização do reservatório Rio das Pedras	49
Figura 15 – Mapa de localização do reservatório Água Vermelha	50
Figura 16 – Mapa de localização do reservatório Capivara	51
Figura 17 – Mapa de localização do reservatório Chavantes	53
Figura 18 – Mapa de localização do reservatório Irapé	54
Figura 19 – Ecobatímetro Echotrac CV100-DF	55
Figura 20 – Barco equipado com o multifeixe Reson SeaBat 7125.	56
Figura 21 – Batimetria Multifeixe e as linhas da batimetria monofeixe no reservatório Rio das Pedras	57
Figura 22 – Batimetria Multifeixe nos reservatórios Água Vermelha, Capivara, Chavantes e Irapé	58
Figura 23 – (A) Levantamento da porção jusante até a parte central do reservatório; (B) Levantamento da área central à montante do reservatório; (C) Levantamento da porção à montante do reservatório	59
Figura 24 – (A) Levantamento do Rio Tibagi, da parte central do Rio Paranapanema e do Rio São Mateus; (B) Levantamento montante Rio Paranapanema até a parte central; (C) Levantamento parte central do Rio Paranapanema à UHE Capivara; (D) Levantamento Ribeirão Vermelho	60
Figura 25 – (A) Levantamento na parte central e na porção jusante do reservatório (Rio Paranapanema); (B) Levantamento montante do reservatório até a parte central; (C) Levantamento parte central-jusante do reservatório da UHE Capivara	61
Figura 26 – (A) Levantamento do corpo principal (braço oeste); (B) Levantamento do braço norte	62
Figura 27 – Processamento e correção de uma linha multifeixe	64
Figura 28 – Plano de referência no cálculo de volume	65
Figura 29 – Raster gerado pelo ferramenta <i>Topo to Raster</i> do reservatório de Chavantes	66
Figura 30 – Script desenvolvido em <i>Python</i> e executado no <i>ArcGis Pro</i>	67
Figura 31 – Linhas das drenagens do reservatório Rio das Pedras.	69
Figura 32 – O volume morto é obtido do nível d’água onde o reservatório perde a capacidade de ser utilizado para o fim do qual foi construído. O volume útil é a parte que compreende a quantidade de água que pode ser utilizada para o fim do qual uma barragem foi construída. O volume maximorum é representado pelo maior nível d’água histórico que o reservatório já atingiu.	73
Figura 33 – Exemplo de diferentes espaçamentos entre seções topobatimétricas; (A) 5 metros; (B) 50 metros; (C) 75 metros; (D) 105 metros; (E) 150 metros; (F) 210 metros.	75

Figura 34 – Modelo digital de terreno gerado por meio do interpolador <i>TIN</i> ; (A) MDT gerado por seções topobatimétricas espaçadas em 5 metros; (B) MDT gerado por seções topobatimétricas espaçadas em 365 metros . . .	76
Figura 35 – Variação do volume dos diferentes espaçamentos em relação a referência, o multifeixe.	78
Figura 36 – Gráfico do espaçamento entre seções <i>versus</i> volume médio	79
Figura 37 – Sinuosidade do canal alagado dos reservatórios representado pela cor azul escura (A) Reservatório Capivara (B) Reservatório Água Vermelha (C) Reservatório Rio das Pedra (D) Reservatório Irapé	81
Figura 38 – Canal do rio Paranapanema no reservatório Chavantes; (A) Porção jusante do reservatório; (B) Porção montante do reservatório	82
Figura 39 – Modelos digitais de terrenos amplificados caracterizando os índices de complexidade de rugosidade, curvatura total, diferença de altura local e desvio padrão da declividade	84
Figura 40 – Mapa de calor dos reservatórios (A) Água Vermelha, (B) Chavantes, (C) Irapé e (D) Capivara, resultante da subtração entre o MDT da batimetria multifeixe e o MDT de 210 metros. Cores quentes indicam valores positivos, cores frias indicam valores negativos e a cor branca indica valores próximos de zero.	85
Figura 41 – Mapa de calor do reservatório Rio das Pedras resultante da subtração entre o MDT da batimetria multifeixe e o MDT de 365 metros. Cores quentes indicam valores positivos, cores frias indicam valores negativos e a cor branca indica valores próximos de zero.	86
Figura 42 – Distribuição da diferença dos pontos de profundidade entre um <i>raster</i> do MDT multifeixe e do MDT de 365 metros para o reservatório Rio das Pedras	87
Figura 43 – Distribuição da diferença dos pontos de profundidade entre um <i>raster</i> do MDT multifeixe e do MDT de 365 metros do reservatório Rio das Pedras	88
Figura 44 – Reservatório Capivara; (A) MDT Multifeixe - O canal sinuoso está destacado pela cor azul clara; (B) MDT 210 metros - Não é possível determinar o canal submerso.	89
Figura 45 – O Diagrama de Taylor resume graficamente quão próximo um conjunto de dados corresponde às observações. A similaridade entre dois padrões é quantificada em termos de sua correlação, sua diferença da raiz do valor quadrático médio centrado e amplitude de suas variações (representadas por seus desvios padrão). Os círculos coloridos representam os modelos interpolados e quanto mais próximos estão do observado, melhor representam os dados observados no multifeixe.	91

Figura 46 – (A) Interpolador <i>Topo to Raster Stream 100m</i> ; (B) Interpolador <i>TIN Stream 100m</i> ;	92
Figura 47 – Histograma das diferenças das profundidades entre multifeixe e monofeixe	93
Figura 48 – Perfil da profundidade das técnicas multifeixe e monofeixe	94
Figura 49 – Modelo digital de terreno gerado pelo interpolador <i>Topo to Raster</i> ; (A) MDT da batimetria multifeixe; (B) MDT da batimetria monofeixe clássica; (C) MDT da batimetria monofeixe com os periféricos	95
Figura 50 – Gráfico da velocidade do som <i>versus</i> profundidade. Em reservatórios o que mais influencia a velocidade de propagação de uma onda acústica é a temperatura, a medida que a profundidade aumenta, a temperatura diminui, e portanto, diminui-se também, a velocidade de propagação. .	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cota x Área x Volume	42
Tabela 2 – Caracterização do reservatório do Rio das Pedras	50
Tabela 3 – Caracterização do reservatório Água Vermelha	51
Tabela 4 – Caracterização do reservatório Capivara	52
Tabela 5 – Caracterização do reservatório Chavantes	53
Tabela 6 – Caracterização do reservatório Irapé	54
Tabela 7 – Relação dos ecobatímetros utilizados na aquisição de dados dos reservatórios indicados e suas resoluções verticais	56
Tabela 8 – Relação dos compensadores de ondas utilizados na aquisição de dados dos reservatórios indicados	57
Tabela 9 – Equidistância máxima permitida das seções topobatimétricas	66
Tabela 10 – Produto final gerado pelo <i>script</i>	68
Tabela 11 – Níveis de referência do volume morto utilizados no cálculo de volume dos reservatórios	74
Tabela 12 – perda de volume para cada espaçamento entre seções topobatimétricas dado em porcentagem	77
Tabela 13 – Resumo estatístico dos pontos de profundidade dos reservatórios	80
Tabela 14 – Resumo estatístico dos pontos de declividade dos reservatórios	80
Tabela 15 – Características do canal submerso dos reservatórios, como sinuosidade, comprimento e largura	81
Tabela 16 – Valores dos índices de complexidade de terreno dos reservatórios	83
Tabela 17 – Volumes do MDT Multifeixe e MDT 365 metros do reservatório Rio das Pedras	87
Tabela 18 – Valores de coeficiente de correlação (R), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), a raiz do erro quadrático médio centrado (CRMSE), o erro médio (BIAS), o <i>spatial skill score</i> (SS) e desvio padrão para cada interpolador e seus espaçamentos	90
Tabela 19 – Perda de volume na interpolação em relação ao multifeixe	90
Tabela 20 – Resumo estatístico da diferença entre as técnicas multifeixe e monofeixe	93
Tabela 21 – Diferença dos Volumes entre as técnicas de aquisição para seções espaçadas em 60 metros.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAV	Cota X Área X Volume
EMAE	Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A.
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IMP	Inserção de Malha de Pontos
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
NA	Nível d'água
RN	Referência de Nível
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
TIN	Triangulated Irregular Network

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivos	26
1.1.1	Objetivo Geral	26
1.1.2	Objetivos Específicos	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	Reservatórios	27
2.1.1	Processos sedimentares em reservatórios	27
2.1.2	Levantamento em reservatórios	28
2.2	Resolução Conjunta ANA/ANEEL	29
2.3	Métodos Acústicos	30
2.3.1	Ondas acústicas	30
2.3.2	Batimetria	32
2.3.2.1	Ecobatímetro monofeixe	33
2.3.2.2	Ecobatímetro multifeixe	34
2.3.2.3	Incertezas na medição da profundidade	36
2.4	Métodos de Interpolação	38
2.4.1	Cálculo de volume em reservatórios	41
2.5	Complexidade de terreno	43
2.5.1	Desvio padrão da declividade	44
2.5.2	Curvatura total	44
2.5.3	Diferença de altura local	45
2.5.4	Rugosidade	45
2.5.5	Sinuosidade do rio	46
3	ÁREAS DE ESTUDO	49
3.1	Reservatório Rio das Pedras	49
3.2	Reservatório Água Vermelha	50
3.3	Reservatório Capivara	51
3.4	Reservatório Chavantes	52
3.5	Reservatório Irapé	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS	55
4.1	Equipamentos e softwares utilizados	55
4.1.1	Conjunto Monofeixe	55
4.1.2	Conjunto Multifeixe	56

4.2	Aquisição dos Dados	57
4.2.1	Reservatório Rio das Pedras	57
4.2.2	Reservatórios Água Vermelha, Capivara, Chavantes e Irapé	58
4.2.2.1	Reservatório Água Vermelha	58
4.2.2.2	Reservatório Capivara	60
4.2.2.3	Reservatório Chavantes	61
4.2.2.4	Reservatório Irapé	62
4.2.3	Amarração altimétrica	63
4.3	Processamento dos Dados	63
4.3.1	Dados batimétricos	63
4.3.2	Dados de Nível	64
4.3.3	Redução da profundidade a cota ortométrica	65
4.4	Interpolação dos dados e cálculo do volume	65
4.5	Comparação Entre Interpoladores	69
4.6	Comparação entre as técnicas monofeixe e multifeixe	71
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
5.1	Calculo do Volume	73
5.2	Características e Morfologia de Fundo	80
5.2.1	Resumo Estatístico	80
5.2.2	Sinuosidade do Rio	81
5.2.3	Índices de complexidade de Terreno	82
5.2.4	Operações em Modelos Digitais de terreno	85
5.3	Comparação Entre Interpoladores	89
5.4	Comparação Entre Batimetria Multifeixe e Monofeixe	92
6	CONCLUSÃO	97
	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

Reservatórios hídricos de reservação tem como finalidade estocar água para usos futuros, abastecimento de água, controle de inundações ou geração de energia; por isso, são geralmente considerados corpos d'água intermediários entre rios e lagos ([CASAMITJANA et al., 2003](#)). 60% dos 227 maiores rios do mundo foram muito ou moderadamente fragmentados por barragens, desviados ou canalizados ([WCD, 2000](#)), causando efeitos que vão desde a alteração do padrão migratório dos peixes, inundação de áreas agrícolas, perda de fauna e flora aquática até a mudança no regime hidrológico e o balanço de sedimento ([TUNDISI, 2003](#)).

Reservatórios funcionam como grandes bacias de detenção de sedimentos, uma vez que há intensificação da deposição de material sólido devido à diminuição da energia do fluxo da água ([LOPES; SANTOS, 2002](#)). Sendo assim, a capacidade dos reservatórios de água é reduzida gradativamente com a deposição de sedimentos que ocorre ao longo do tempo. Parte importante do gerenciamento de recursos hídricos é a avaliação do volume útil de reservatórios, parte destinada à geração de energia, estimado em sua fase de seu pré-enchimento, utilizando a relação cota/volume durante seu funcionamento ([MATOS, 2012](#)). Estimativas atuais das capacidades dos reservatórios que não possuem novos levantamentos desde sua construção, podem apresentar erros significativos ([FURNANS; AUSTIN, 2008](#)).

Devido à importância do conhecimento da capacidade efetiva dos reservatórios para a gestão de produção energética do Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Agência Nacional de Águas (ANA) publicaram em 10 de outubro de 2010 a Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 03. O artigo 8º dessa resolução trata sobre a obrigatoriedade de avaliação do processo de assoreamento dos reservatórios das usinas despachadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), com base na atualização das curvas Cota x Área x Volume (CAV). Ainda de acordo com essa Resolução Conjunta, o mapeamento da área molhada dos reservatórios deve ser executado por meio de ecobatímetros de feixe único (monofeixe) ou de múltiplos feixes (multifeixe) ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2013](#)).

Levantamentos batimétricos em reservatórios têm como objetivo atualizar as estimativas de volume e servir como base de dados para projeções futuras da capacidade de armazenamento de água e taxa de sedimentação ([WILSON; MORLOCK; BAKER, 1997](#)). Sendo a batimetria, geralmente, um processo caro e demorado ([ALCÂNTARA et al., 2010](#)), existe interesse em realizar os levantamentos com um maior espaçamento entre as seções batimétricas, o que por um lado reduz o tempo necessário, e por outro leva a maiores erros na modelagem de terreno; conseqüentemente, maiores erros no cálculo das

curvas CAVs. Portanto, estudos e análises das diretrizes que envolvem a aquisição de dados e as metodologias de construção de modelo de terreno dos reservatórios são temáticas atuais e importantes para o maior entendimento e gestão desses sistemas hídricos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência de diferentes métodos e técnicas de medição sobre a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e o impacto sobre o cálculo de volume de reservatórios, afim de subsidiar a escolha dos métodos com base em índices correlacionados com contexto morfológico e estimar os possíveis erros.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as diferenças entre os volumes estimados a partir de MDTs calculados com base em dados batimétricos multifeixe e monofeixe simulado por re-amostragem do multifeixe, com diferentes espaçamentos, tendo como base a resolução da Agência Nacional de Águas para obtenção de curvas CAVs.
- Avaliar a influência da complexidade de terreno na interpolação de dados na geração de modelos digitais de terreno.
- Identificar a metodologia de interpolação que melhor represente o relevo do reservatório entre as duas mais utilizadas nos sistemas de informação geográficas: *Topo to Raster* e *TIN*.
- Comparar o impacto no cálculo do volume das metodologias e técnicas de aquisição batimétrica multifeixe e monofeixe.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESERVATÓRIOS

Os reservatórios hídricos são construídos para múltiplos fins, como o controle de inundações, irrigação, abastecimento de água em cidades, produção de energia elétrica, recreação, navegação, conservação e controle de qualidade da água (FERRARI, 2006).

A capacidade de um reservatório é determinante e crítica na definição da utilização de sua água, no entanto, problemas com assoreamento reduzem a eficácia e longevidade em seu funcionamento. Pesquisas em reservatórios de água focam em medir a área e a capacidade atual do reservatório, sendo a deposição de sedimentos e/ou a erosão as principais causas de mudanças na capacidade de armazenamento de água (FERRARI, 2006).

O Brasil possui 68,1% da produção de energia elétrica obtida através de usinas hidrelétricas e o número de construção de reservatórios vem crescendo para suprir o aumento da demanda energética (CARVALHO, 2008). Dessa forma, estudos acerca de reservatórios e sua manutenção, como estimativas de volume e perda de capacidade por assoreamento veem se tornando cada vez mais importantes.

2.1.1 PROCESSOS SEDIMENTARES EM RESERVATÓRIOS

A sedimentação é um processo de deposição natural e contínuo responsável por reduzir a vida útil do reservatório (YANG, 2006). Porém, apesar de ser um processo natural, a construção da barragem e a formação do seu reservatório modificam as condições do curso d'água, ocasionando uma maior erosão, uma menor capacidade de carregar os sedimentos, e por isso, uma maior deposição de partículas em suspensão ao longo do reservatório.

A erosão corresponde à desagregação e remoção da partícula da rocha e/ou do solo (CARVALHO, 2008) e pode ser causada de forma natural por meio do intemperismo (vento e água), da excursão térmica e do gelo, ou por agentes biológicos, como o gado ou a ação humana (XIAOQING; YANG, 2003).

No ambiente natural, o processo de erosão causado pela água, acontece por meio da separação das partículas através da energia de impacto das gotas de chuva no solo e pelas forças geradas devido à ação de escoamento das águas. A partícula solta pode ser deslocada, processo que depende da forma, tamanho, peso da partícula e das forças exercidas pela ação do escoamento. O transporte dos sedimentos ocorre até o ponto em

que as forças sejam anuladas e não existam mais condições do deslocamento da partícula, ocorrendo o processo de deposição.

O desague de rios e córregos nos reservatórios, leva a passagem de ambiente confinados para ambientes abertos, aumentando as áreas de suas seções transversais aumentada e diminuindo a velocidade do fluxo d'água, dessa forma tem-se a perda na capacidade de transporte do sedimento e conseqüentemente a deposição dos sedimentos transportados. A deposição dos sedimentos pode ocorrer a montante e nos afluentes dos reservatórios, de modo geral, sedimentos mais grossos se depositam nas áreas mais a montante, enquanto os sedimentos mais finos adentram o reservatório (FERRARI, 2006).

Os sedimentos não se depositam de maneira uniforme nos reservatórios. Segundo Carvalho (2008), a deposição nos reservatórios na região a montante pode ser classificada como depósito de remanso (*backwater deposit*) e as deposições que ocorrem ao longo do reservatório podem ser classificadas como deltas, depósitos de margem (*overbank*) e depósitos de leito (*bottom-set deposit*). O delta é formado por sedimentos grossos, enquanto os depósitos interiores são formados por sedimentos mais finos. Além desses, depósitos produzidos por enchentes ocorrem ao longo do curso d'água e do reservatório, sendo formados por sedimentos finos a grossos e denominados depósitos de várzea ou depósitos de planície de inundação.

O aumento do assoreamento dos reservatórios diminui a capacidade de armazenamento de água diminui, aumentando a influência do remanso a montante e da velocidade do fluxo d'água, até que se atinja um ponto em que a carga de sedimento levada para dentro do reservatório é maior que a de escoamento. A consequência desse processo é inviabilizar a atividade para qual o reservatório foi construído, marcado, em usinas hidrelétricas, pela chegada dos sedimentos na tomada d'água e pelo escoamento desse material junto à água na geração de energia, até que a altura dos depósitos se eleve e ocorra a obstrução total.

2.1.2 LEVANTAMENTO EM RESERVATÓRIOS

A constante avaliação da sedimentação em reservatórios é a melhor maneira de avaliar a situação e de se estimar a entrada e deposição de sedimentos. A acumulação e a distribuição de sedimentos nos reservatórios são geralmente obtidos por meio de cálculos com base nos métodos de levantamento de contorno ou de levantamento de linhas topobatimétricas (YANG, 2006).

O método de levantamento de contorno utiliza os preceitos do mapeamento topográfico (e. g. aerofotogrametria) para se obter os diferentes níveis do reservatório, incluindo os níveis muito baixos. Esse método, comumente resulta em um mapa com linhas de contorno com intervalos que podem variar de 1 a 5 metros. A aplicabilidade deste método à atualização do volume de reservatórios já em funcionamento é limitada a reservatórios

pequenos ou que podem ser esvaziados até um nível muito baixo.

O método de levantamento de linhas topobatimétricas é o mais utilizado dentre os diversos tipos de reservatório. Esse método correspondente ao levantamento topohidrográfico do reservatório. Sua vantagem sobre o método de contorno é a rapidez de obtenção dos dados, porém, com isso, sua desvantagem é uma menor precisão. A precisão do levantamento é função da distância, do número de seções batimétricas levantadas, da escala do mapa e dos métodos de trabalho. O levantamento topobatimétrico é feito por linhas transversais no corpo principal e nos braços dos reservatórios. Onde, quanto mais próximas as seções de amostragem do fundo, mais preciso será o levantamento. É importante levar em conta que, os perfis devem ter um menor espaçamento na área do delta e em áreas com leito irregular e com forte inclinação.

Segundo [Morris e Fan \(1997\)](#), o espaçamento entre as seções topobatimétricas depende do tamanho e da geometria do reservatório. A partir de estudos em 57 reservatórios com áreas entre 30 e 15 mil hectares, o valor máximo do espaçamento entre as seções topobatimétricas na aquisição de dados para cada reservatório, pode ser obtido pela fórmula:

$$N_{ST} = 2,942 \cdot A^{0,3652} \quad (2.1)$$

Onde o espaçamento das seções topobatimétricas (N_{ST}) é função da área do reservatório (A), em hectares.

Nas últimas décadas, os avanços tecnológicos no desenvolvimento de sistemas acústicos levaram a ferramentas mais precisas para o levantamento topográfico de ambientes submersos. Atualmente, é possível investigar o fundo por meio da tecnologia, não apenas ao longo da linha de navegação, mas ao longo de uma ampla faixa lateral (*swath*) ([SOUZA, 2006](#)). A batimetria multifeixe possui um alcance que varia em função da profundidade local. De modo geral, sua varredura lateral é equivalente a três ou quatro vezes a espessura da coluna d'água, o que garante uma alta densidade de pontos batimétricos e a “total” investigação da superfície de fundo de um reservatório, trazendo benefícios ao processo de análise da morfologia de fundo.

2.2 RESOLUÇÃO CONJUNTA ANA/ANEEL

A Resolução Conjunta da Agência Nacional de Águas e Agência Nacional de Energia Elétrica nº 03, de 10 de agosto de 2010, em seu artigo 8º versa sobre a obrigatoriedade de avaliação do processo de assoreamento dos reservatórios, com base na atualização das curvas Cota x Área x Volume, das usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2013](#)).

Com relação ao mapeamento da área molhada do reservatório, a resolução determina que a execução dessa atividade deverá ser efetuada por meio de ecobatímetros monofeixe ou multifeixe. Onde, para trabalhos realizados com ecobatímetros monofeixe, em Usinas Hidrelétricas (UHE), a equidistância máxima permitida entre as seções topobatimétricas, no corpo principal do reservatório, é dada pela fórmula:

$$E_{ST} = \frac{0,35 \cdot A^{0,35}}{D} \quad (2.2)$$

Em que a equidistância das seções topobatimétricas transversais (E_{ST}) dada em quilômetros é uma função da área do reservatório em seu nível operacional normal (A), em hectares, pela extensão do corpo principal do reservatório (D) em seu nível operacional normal, dado em quilômetros.

Para os afluentes, canais e tributários do reservatório o espaçamento entre as linhas de aquisição de dados transversais à área deve ser igual à metade das seções realizadas no corpo hídrico principal. Quanto às linhas longitudinais, o espaçamento é igual a três vezes o espaçamento das seções praticadas para as linhas de sondagem transversais. Levantamentos batimétricos com tecnologia multifeixe, devem seguir linhas de aquisição paralelas às isóbatas do reservatório, recobrando 100% da área do leito do reservatório, não sendo aceitos espaços não amostrados.

2.3 MÉTODOS ACÚSTICOS

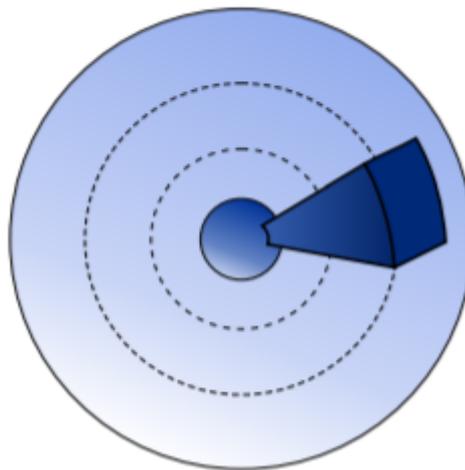
2.3.1 ONDAS ACÚSTICAS

De todas as formas de radiação conhecidas, o som é a que se propaga por maiores distâncias em um ambiente aquático. Por isso, o som é utilizado para diversos usos na exploração do fundo de rios, lagos e oceanos. Equipamentos que utilizam a onda sonora como fonte são conhecidos como sonares por unidade de área (URICK, 1983). O som é uma onda que transporta energia mecânica, caracterizada por flutuações de pressão em um meio compressível.

Durante a propagação do som na água ocorre a variação da velocidade das partículas do meio em uma série de movimentos oscilatórios longitudinais (paralelos a direção de propagação da onda) conhecidas como ondas compressivas as quais apresentam uma velocidade que varia de acordo com as características de salinidade, pressão e temperatura (GERGES, 1992). No decorrer da propagação da onda sonora, tem-se o decaimento do nível de pressão do som em função de dois mecanismos: a perda de energia decorrente da absorção causada pelo meio e a perda geométrica, devido a conservação da energia em uma frente de onda.

A perda geométrica está associada a energia da onda que é distribuída igualmente ao longo de uma área esférica ao redor da fonte de emissão sonora (Figura 1). Conforme a frente de onda se afasta do centro, a área da esfera aumenta, porém, a energia contida nesta permanece constante, forçando a energia a se espalhar ao longo de áreas maiores e assim, diminuindo a intensidade sonora (RISTOW, 2015).

Figura 1 – Propagação de frente de onda esférica



Fonte: Ristow (2015)

A propagação da onda no meio também acarreta na perda de energia pela colisões entre as moléculas de água, com conseqüente geração de calor pelo atrito entre as moléculas e transformação da energia mecânica em térmica. A energia perdida na propagação das ondas, tanto por divergência geométrica quanto por absorção, é denominada atenuação, implicando na redução da amplitude da onda (RISTOW, 2015).

A atenuação por absorção das ondas sonoras tem relação direta com sua frequência: altas frequências são atenuadas rapidamente, enquanto frequências extremamente baixas podem ser propagadas por centenas de quilômetros sem sofrer atenuações significantes. Um sonar operando com 12 kHz perde apenas cerca de metade de sua energia por absorção viajando 3000 metros pela água (STREET, 2000).

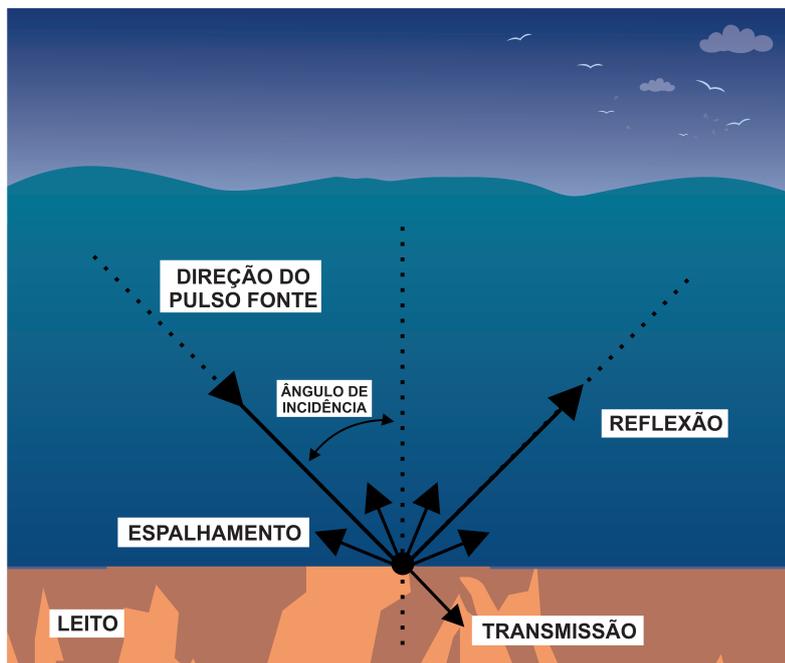
Apesar da energia acústica se propagar por longas distâncias na água, ela é facilmente refletida e refratada pela mudança das propriedades do meio, como o encontro com rochas ou sedimentos. A passagem do pulso sonoro entre diferentes meios leva à transferência de parte de sua energia para o novo material.

A quantidade de energia que é transmitida depende de dois fatores principais: a mudança da impedância acústica e rugosidade do novo material (densidade e velocidade do som nesse novo meio). Parte da energia que não é transmitida para o meio retorna para

o meio aquático preferencialmente segundo a direção de incidência da onda enquanto o restante da energia é espalhada (*scattered*) em diversas direções (Figura 2).

A energia que é refletida e o efeito de retroespalhamento, dependem das características do material, do meio e do ângulo de incidência da onda acústica. A energia que retorna para água, ou em outras palavras, a energia que não é transmitida para o meio na superfície de fundo é chamada de eco, que mantém a frequência da sua onda originária (STREET, 2000).

Figura 2 – Onda acústica se propagando no meio



2.3.2 BATIMETRIA

A batimetria representa o primeiro e mais tradicional método acústico de investigação de áreas submersas, evoluindo das medidas feitas com cordas e pesos que atingiam o fundo submerso e marcavam a profundidade, para sistemas com alta frequência, permitindo a confecção de mapas precisos, fornecendo dados da topografia de fundo com os sistemas monofeixe, multicanais e multifeixes (conjunto de transdutores formado por múltiplas fontes de sinais acústicos) (SOUZA, 2006).

Os instrumentos utilizados na batimetria são conhecidos como ecobatímetros, que tem como função medir, de forma acurada, a distância entre o transdutor (emissor e receptor do pulso acústico) e o fundo submerso. Levantamentos batimétricos utilizam altas frequências, dessa forma, as ondas emitidas dificilmente são refratadas em subsuperfície; tendo como foco principal medir a espessura da coluna d'água imediatamente

abaixo do equipamento (ecobatímetro monofeixe) ou a espessura em uma faixa de alcance (ecobatímetros multifeixe).

A espessura da coluna d'água é determinada, a partir da velocidade de propagação do som na água e o tempo de retorno do primeiro eco (sinal) refletido. Sob condições ideais, onde o fundo submerso é plano, o eco representa um ponto localizado diretamente abaixo do transdutor, uma vez que esta é a menor distância entre ele e o fundo.

$$Profundidade = Velocidade\ do\ Som \cdot \frac{Tempo\ do\ Eco}{2} \quad (2.3)$$

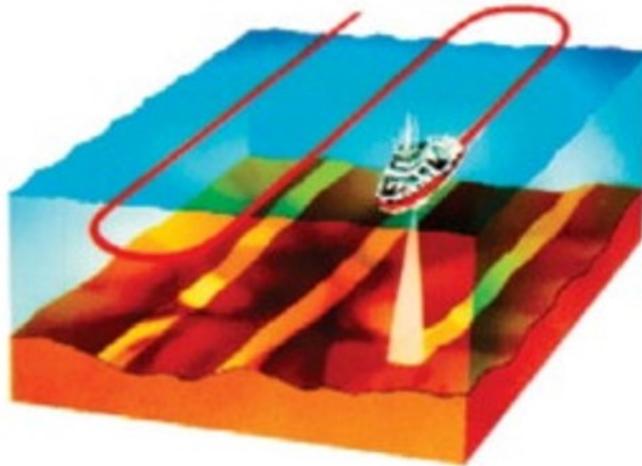
O tempo registrado do sinal corresponde ao tempo duplo, ou seja, o tempo de ida e volta do sinal entre a emissão e o seu retorno. Por isso, para o cálculo da espessura o tempo é dividido por dois.

2.3.2.1 ECOBATÍMETRO MONOFEIXE

Ainda hoje, a maioria dos levantamentos utilizando sistemas acústicos é realizado por meio da batimetria monofeixe. O ecobatímetro monofeixe consiste em quatro componentes básicos: um transmissor, um transdutor, um receptor e um sistema de controle e visualização. Este sistema grava uma medida de profundidade a cada pulso acústico (*ping*) de áreas submersas (Figura 3). Comumente, utiliza-se uma embarcação e um sistema de posicionamento global (*DGPS*) com o objetivo de construir um mapa tridimensional com coordenadas x, y e z do fundo de corpos hídricos (STREET, 2000).

Em um levantamento batimétrico monofeixe adota-se linhas de sondagem paralelas e perpendiculares às isóbatas e ao talvegue (ponto de maior profundidade) do rio que foi represado, garantindo desta forma o correto delineamento da feição do fundo do reservatório. As distâncias entre as linhas de sondagem dependem da escala final e da resolução do produto desejado (EL-HATTAB, 2014).

Figura 3 – O ecobatímetro monofeixe emite um feixe diretamente abaixo da embarcação



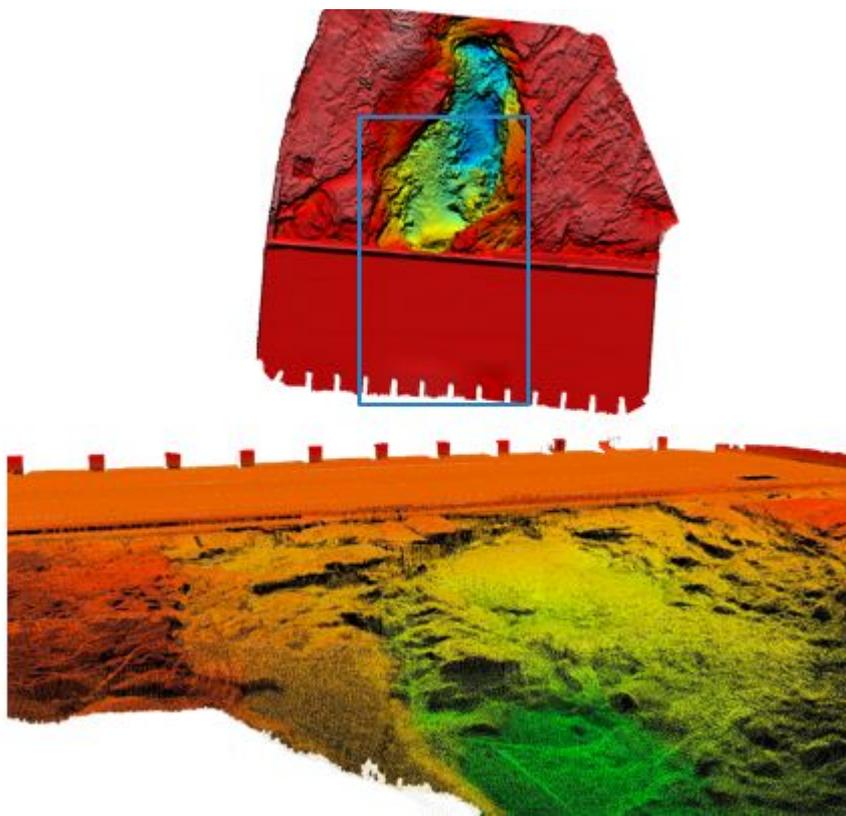
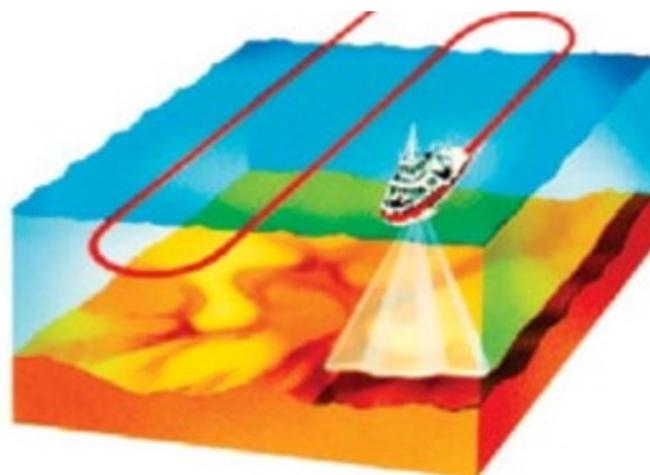
Fonte: Kearns e Breman (2010)

2.3.2.2 ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE

O ecobatímetro multifeixe é um instrumento que permite mapear uma grande quantidade de pontos do fundo submerso com um único pulso/disparo de alta resolução (Figura 4). Num levantamento batimétrico com equipamentos multifeixe, a área de fundo é mapeada com continuidade, constituindo, geralmente, faixas de pontos na direção perpendicular à direção de deslocamento do barco (para ambos os lados), conhecida como sistema de varredura (*swath*) (Figura 5) (SOUZA, 2006). Sua dimensão é dada como um ângulo fixo ou uma medida física que muda de acordo com a profundidade.

O emprego de um instrumento multifeixe é reconhecido pela sua eficiência, permitindo a produção de mapas batimétricos em curtos períodos e com alta resolução e acurácia. Na prática, com o uso desta tecnologia, o trabalho de um ecobatímetro monofeixe está sendo realizado em diversos pontos no fundo do corpo hídrico de uma só vez. Em um levantamento batimétrico multifeixe adota-se linhas de sondagem paralelas às isóbatas, ou seja, no sentido longitudinal do talvegue.

Figura 4 – Mapa batimétrico multifeixe de alta resolução

Figura 5 – Funcionamento do ecobatímetro multifeixe demonstrando o (*swath*)

Fonte: Kearns e Breman (2010)

2.3.2.3 INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE

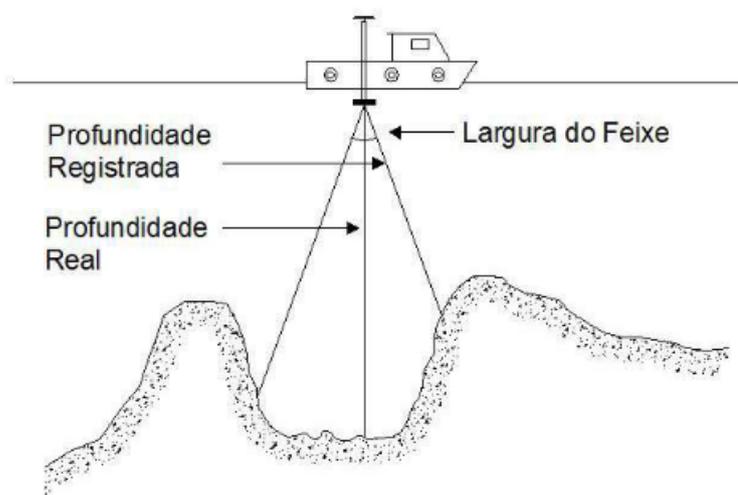
O processo de determinação da profundidade reduzida se baseia na integração de diversas medições individuais. O ecobatímetro multifeixe e monofeixe apenas mede o tempo decorrido desde que um pulso acústico é transmitido na água até o momento em que retorna para o transdutor após refletir-se no fundo; e no caso dos sistemas multifeixes mede-se, também, a direção do retorno (DHN, 2017). De acordo com USACE (2013), além do ecobatímetro, a incerteza de medição da profundidade possui muitas fontes em potencial. Tais como a velocidade da propagação da onda, imersão do transdutor, a largura do feixe acústico emitido pelo transdutor (*beamwidth*), o tipo e formato de fundo, os movimentos e direção da embarcação (*roll-pitch-heave-heading*), *offsets*, etc.

Determinar a velocidade do som é talvez o fator mais crítico numa sondagem batimétrica, devido a sua variação local (à superfície) e ao longo da coluna d'água (USACE, 2013). Os principais fatores que contribuem para a variação da velocidade do som é a temperatura, a salinidade e a pressão, sendo que a primeira é a que tem mais contribuição em rios e reservatórios. (FERREIRA et al., 2016). Estima-se que uma variação de 1°C na temperatura traduz-se, aproximadamente, numa variação de 4,5 m/s na velocidade (IHO, 2005). Enquanto que uma incerteza de 1 m/s na estimativa da velocidade do som resultará em uma incerteza de 1 cm em uma sondagem de 15 m.

Outro fator, importante, que causa incerteza nas medições é abertura angular dos feixes, junto ao tipo de fundo. Os *softwares* de aquisição e processamento, de forma geral, detectam o fundo a partir do primeiro retorno da onda acústica transmitida e em fundos de alta complexidade torna-se um problema, onde a profundidade registrada pelo ecobatímetro difere da profundidade real (Figura 6) (FERREIRA et al., 2016).

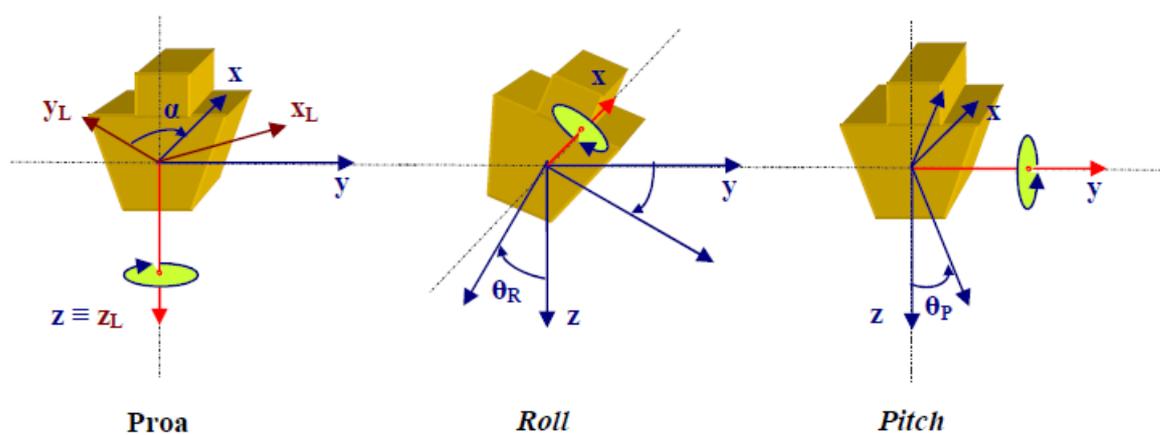
Incertezas também são provocadas pelo balanço da embarcação, como os movimentos de *roll* (balanço), *pitch* (caturro) e *heave* (arfagem) (IHO, 2005). Sendo assim, as profundidades observadas devem ser compensadas dos valores de rotação em torno do eixo longitudinal da plataforma de sondagem (*roll* - ϕ), dos valores de rotação em torno do eixo transversal da plataforma de sondagem (*pitch* - θ) e do movimento vertical da plataforma de sondagem (*heave*). Considerando o caso ideal de um fundo plano, um desvio em *roll* ou *pitch* de 1° conduziria a uma incerteza vertical de aproximadamente 2 mm em uma profundidade local de 10 m. Os movimentos de *roll* e *pitch* da plataforma de sondagem (Figura 7), implicarão em uma inclinação da antena *GPS*, causando também incertezas no posicionamento planimétrico (FERREIRA et al., 2016).

Figura 6 – Incerteza devido à abertura angular do feixe e à mudança abrupta do relevo submerso.



Fonte: Ferreira et al. (2016)

Figura 7 – Incerteza devido ao balanço da embarcação.



Fonte: IHO (2005)

2.4 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

A interpolação é a técnica utilizada para estimar o valor de um atributo em um local não amostrado, a partir de pontos amostrados na mesma área ou região (PAVÃO *et al.*, 2011). A interpolação espacial converte dados de observações pontuais em campos contínuos, produzindo padrões espaciais que podem ser comparados com outras entidades espaciais contínuas. O princípio da interpolação é que, em média, os valores do atributo tendem a ser similares em locais mais próximos do que em locais mais afastados.

Métodos diferentes de interpolação podem ser utilizados para se obter o modelo digital de terreno (LI; ZHU; GOLD, 2004). Miller e Laflamme (1958) definem o Modelo Digital de Terreno (MDT) como uma representação estatística da superfície contínua do terreno por um número de pontos selecionados com coordenadas X, Y, Z conhecidas. Ainda, de acordo com Felgueiras (1987), o MDT é gerado a partir de um modelo matemático que representa a distribuição espacial de alguma característica vinculada a superfície real, como relevo, temperatura, densidade populacional, etc.

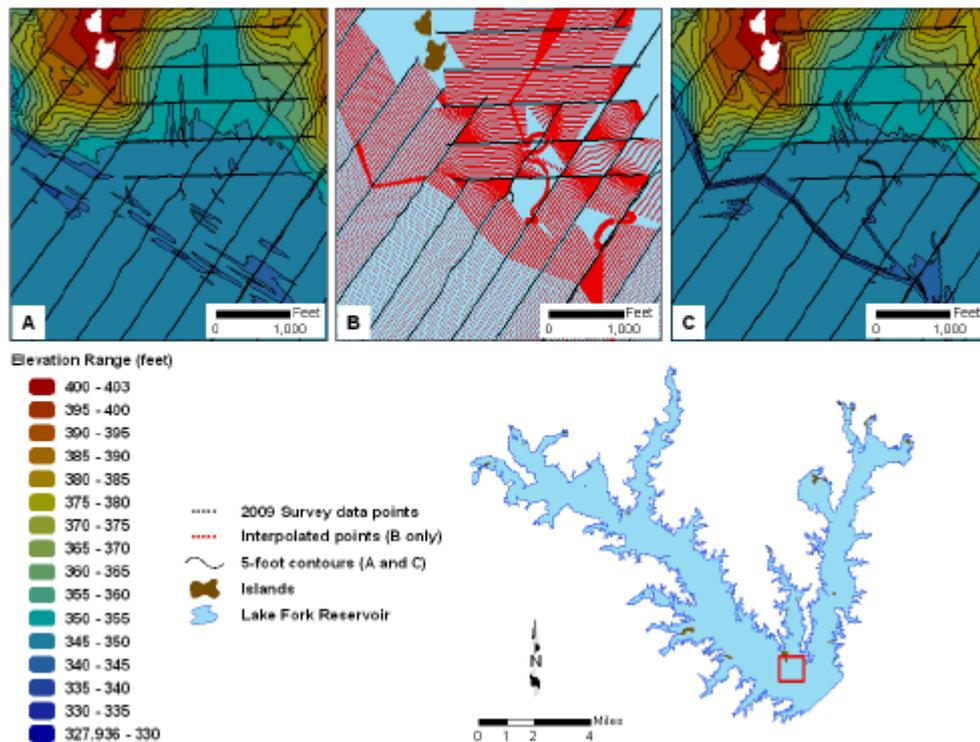
Dentre os interpoladores disponíveis na literatura, pode-se citar o *Triangulated Irregular Network* (TIN), o Inserção de Malha de Pontos (IMP) e o *Topo to Raster* quando se objetiva a obtenção de um modelo digital de terreno para o cálculo de capacidade volumétrica de armazenamento de águas em reservatórios, por exemplo (MATOS, 2012).

O interpolador *Triangulated Irregular Network* (TIN) é o mais utilizado na geração de MDT quando se têm dados topobatimétricos de seções transversais (USACE, 2004). O método gera um conjunto de triângulos adjacentes não sobrepostos a partir de pontos espaçados com coordenadas X, Y, Z, procurando formar um conjunto ótimo de triângulos conectados para representar a superfície do terreno. Este método preserva todos os pontos adquiridos, sendo posteriormente as curvas de nível interpoladas (FERRARI, 2006). O software Arcgis utiliza o modelo TIN com critério *Delaunay* em que: pontos mais próximos do ponto a ser estimado influenciam mais em sua estimativa do que pontos mais distantes do mesmo; restringindo, porém, essa influência aos três pontos mais próximos e ignorando os pontos restantes.

Furnans (2006), em seu trabalho, mostra que o método TIN é o mais efetivo para representar a superfície do reservatório quando os dados são coletados perpendicularmente ao canal submerso. Porém, ele ressalta que o método de triangulação *Delaunay* apresenta feições irregulares na geração do MDT próximas à borda do reservatório, e apresenta em algumas regiões descontinuidade do canal submerso. Para resolver este problema, o autor descreve um método que cria seções intermediárias entre seções topobatimétrica, chamado *Self-Similar Interpolation*, em que após a introdução destas novas seções artificiais é gerado novamente um MDT utilizando o interpolador TIN (Figura 8).

O método *Self-Similar Interpolation* foi desenvolvido pelo Furnans para Texas

Figura 8 – (A) Interpolação pelo método *TIN*, em que essa não apresenta continuidade do canal submerso. (B) Seções geradas artificialmente entre as seções obtidas em campo. (C) Interpolação através do método *Self-Similar Interpolation*, representando o canal devidamente.



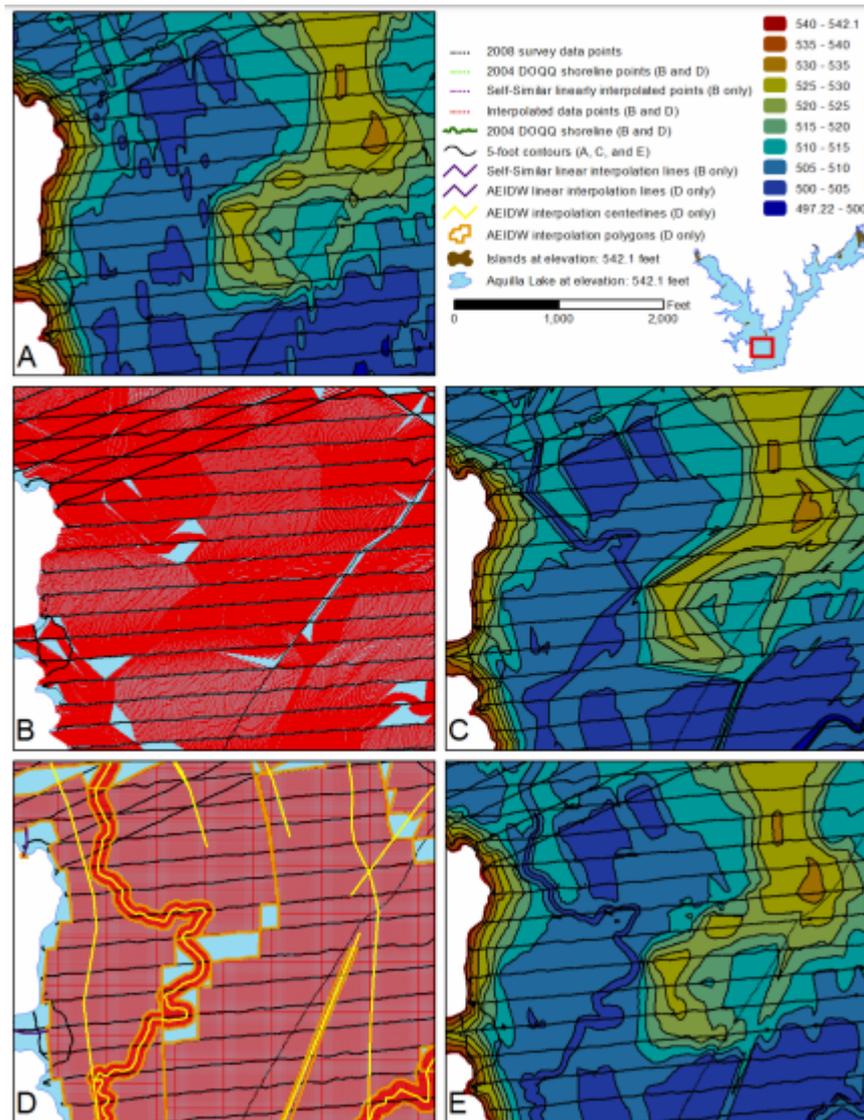
Fonte: TWDB (2009)

Water Development Board (TWDB, 2009). Este método foi utilizado pela TWDB até o ano de 2010 quando a empresa desenvolveu e passou a usar o *Anisotropic Elliptical Inverse Distance Weighted Interpolation* que utiliza o algoritmo da interpolação do inverso da potência das distâncias do software *Matlab* (TWDB, 2016). Neste método cria-se no software *Arcgis* polígonos dividindo o reservatório em segmentos com uma linha central definindo a direção em que a interpolação deve ocorrer (Figura 9). A linha central deve ser definida seguindo a calha do rio submerso.

Matos, Estigoni e Mauad (2011) também apresentam que estudos realizados pelo EESC-USP indicam o método de triangulação *Delaunay* como responsável pelas irregularidades na representação de feições próximas às margens do reservatório (Figura 10). Tais irregularidades são expressas em grandes faces planas e discontinuidades que ocorrem pela interpolação de alguns pontos do contorno do reservatório com pontos das seções transversais adquiridas.

Saito (2011) descreve outra metodologia de interpolação que foi especificamente desenvolvida para gerar modelos digitais de terreno hidrograficamente condicionados

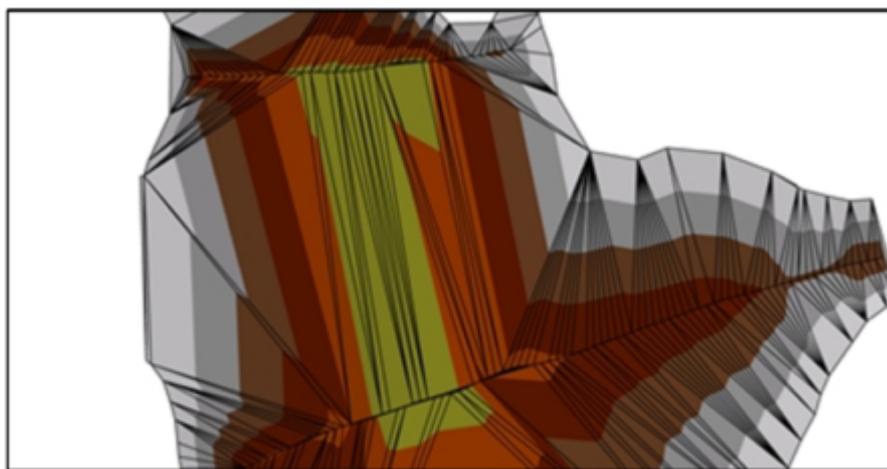
Figura 9 – Aplicação dos interpoladores *Self-Similar* e *Anisotropic Elliptical Inverse Distance Weighted*, A) linhas de contorno batimétricas sem a inserção de pontos interpolados, B) pontos de aquisição (preto) e pontos gerados por meio da *Self-Similar Interpolation* (vermelho), C) linhas de contorno geradas por meio da *Self-Similar Interpolation*, D) pontos de aquisição (preto) e pontos gerados por meio da *Anisotropic Elliptical Inverse Distance Weighted*, E) linhas de contorno geradas por meio da *Anisotropic Elliptical Inverse Distance Weighted*.



Fonte: TWDB (2016)

para obtenção de uma melhor representação das características anisotrópicas do relevo: o interpolador *Topo to Raster*. Esse método de interpolação foi criado por Hutchinson (1989) e é baseado em diferenças finitas iterativas que geram uma grade regular a partir de curvas de nível e/ou pontos cotados, permitindo a imposição de linhas características tais como divisores de água e rede de drenagem. É a interpolação indicada para se destacar córregos, drenagens, calhas de rio, cumes e falésias.

Figura 10 – Detalhes do modelo digital de terreno e TIN gerados para o reservatório de Bariri – SP entre duas seções batimétricas



Fonte: [Matos, Estigoni e Mauad \(2011\)](#)

[Matos \(2012\)](#) em sua tese de doutorado desenvolveu a metodologia conhecida como Inserção de Malha de Pontos (IMP) por meio de uma rotina computacional chamada CAV-NH e desenvolvida em *Python*, linguagem compatível com o software *Arcgis*. O método IMP, de modo geral, diminui a influência da borda do reservatório inserindo uma malha regular de pontos interpolados e aumenta a influência da triangulação entre as seções batimétricas na geração do MDT. Em reservatórios pequenos, os resultados mostraram o aumento da precisão no cálculo do volume mesmo com menos seções topobatimétricas e com maior espaçamento entre elas.

2.4.1 CÁLCULO DE VOLUME EM RESERVATÓRIOS

Até a década de 1990, vários métodos tradicionais foram apresentados com o intuito de determinar o volume a partir de dados batimétricos. Com a evolução dos computadores, houve um aumento da capacidade de processamento e, também, do desenvolvimento de ferramentas de geoprocessamento e, com isso, os métodos tradicionais foram sendo substituídos por métodos automatizados ([MATOS, 2012](#)).

O cálculo de volume é realizado a partir da representação de uma superfície real a partir de modelagens matemáticas que utilizam os pontos amostrados, com uma certa precisão, densidade e distribuição. Os resultados são armazenados em uma determinada estrutura de dados e são posteriormente interpolados para a obtenção de um modelo digital de terreno ([LI; ZHU; GOLD, 2004](#)). A partir do modelo digital de terreno é possível gerar as curvas Cota x Área x Volume (CAV).

Na operação dos reservatórios as curvas CAVs são utilizadas para definir as estraté-

gias de gestão dos recursos hídricos como, por exemplo, o controle de vazão e geração de energia que são definidos pela quantidade de água disponível no volume útil do reservatório. Das curvas, tiram-se as informações de área e volume referente a cota em que o nível do reservatório se encontra. A Tabela 1 e a Figura 11 exemplificam como são correlacionadas as curvas CAVs, onde quanto maior a cota, maior a área e, conseqüentemente, maior o volume.

Figura 11 – Gráfico Cota x Área x Volume

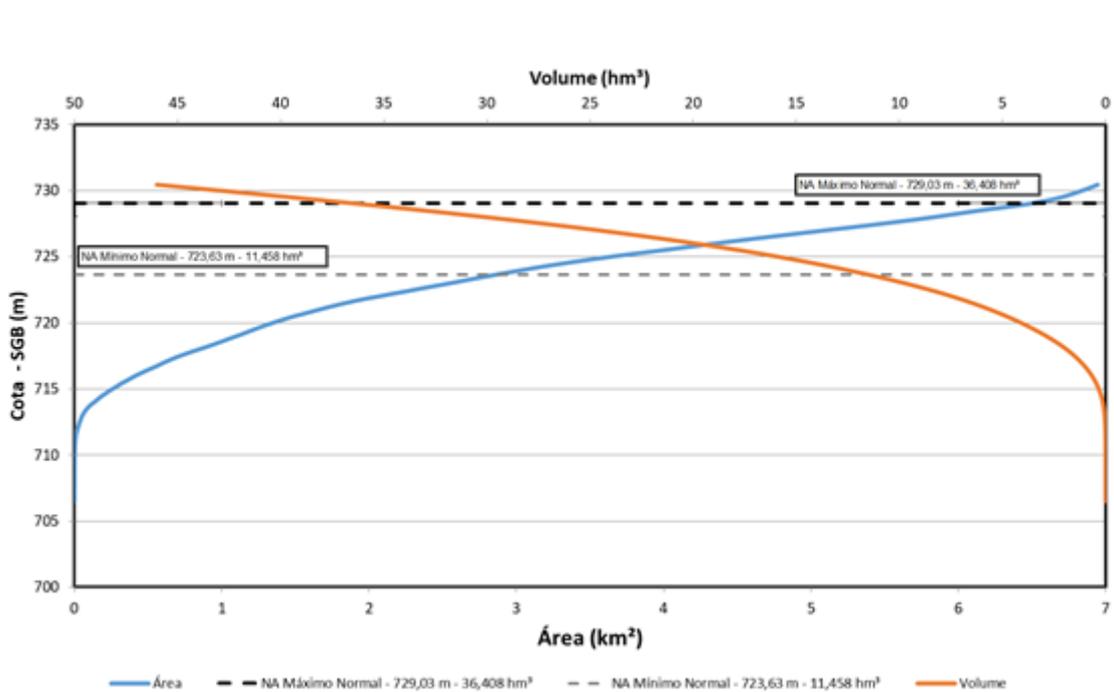


Tabela 1 – Cota x Área x Volume

Cota (m)	Área (Km ²)	Volume (hm ³)
729,93	6,820	42,418
729,50	6,698	39,511
729,03	6,494	36,408
729,00	6,477	36,213
728,50	6,145	33,056
728,00	5,833	30,062
727,50	5,481	27,232
727,00	5,096	24,586

2.5 COMPLEXIDADE DE TERRENO

A complexidade de terreno é um importante parâmetro utilizado na análise de modelos digitais de terreno e é, comumente, aplicado nos trabalhos de redução de dados topográficos, classificação e visualização do terreno, mapeamento e levantamento topográfico, uso da terra, erosão do solo, avaliação de riqueza e análise na precisão de modelos digitais de elevação (MDE) (HUAXING, 2008).

Segundo Huaxing (2008), a complexidade do terreno tem uma implicação amplamente semântica e é frequentemente usada para descrever a variabilidade da superfície de terreno. Normalmente, caracteriza-se essa variabilidade por meio de cálculos estatísticos ou geométricos, e até mesmo, qualitativamente. Quando descrita pela estatística, utiliza-se parâmetros do terreno como, por exemplo, elevação, inclinação, aspecto e curvatura. Entretanto, quando descrita pela geometria, a complexidade de terreno é definida pela medição de configurações de forma, ou rugosidade da superfície, em plano e perfil (HENGL, 2009).

A complexidade de terrenos geralmente tenta definir a diversidade de configurações de formas de relevo com dados de elevação. A partir dos dados de elevação é possível realizar diversas medições da superfície do terreno, definindo assim, o Índice de Complexidade de Terreno (ICT).

Abordagens de análise da complexidade da superfície de modelos digitais de terreno podem variar dependendo da informação que se deseja obter. Huaxing (2008) afirma que com apenas um único Índice De Complexidade De terreno (TCI) não é possível determinar com precisão o quão complexo um terreno é, por isso, em seu trabalho, ele sugere a utilização do Índice Composto De Complexidade De terreno (CTCI). Um CTCI permite considerações mútuas de múltiplos interesses, capazes de serem replicadas para várias pesquisas ou objetivos (DAWSON, 2016).

Em seu trabalho, Huaxing (2008) escolheu quatro TCIs para obter o CTCI: *os índices de rugosidade, diferença de altura local, curvatura total e desvio padrão da declividade*.

Usando como base o trabalho de Huaxing, calculou-se todos os TCIs a partir do MDT da batimetria multifeixe com resolução espacial de um metro pelo *software ArcGis Pro* que utiliza o método de janela móvel de 3x3 metros. Após encontrar os valores dos quatro TCIs, foi calculado o CTCI, para isso, deve-se normalizar todos os índices para que estes possuam uma escala com valores de 0 a 1. A equação para normalizar os TCIs é:

$$NTCI = \frac{TCI - TCI_{min}}{TCI_{max} - TCI_{min}} \quad (2.4)$$

Onde o NTCI é o valor de cada TCI normalizado e o TCI_{min} e TCI_{max} são os valores de TCI mínimo e TCI máximo, respectivamente. Após normalizar os índices, a

média aritmética simples dos quatro índices normalizados produzem o valor de CTCI (Equação 2.5).

$$CTCI = \frac{N_{ru} + N_{da} + N_{cu} + N_{dp}}{4} \quad (2.5)$$

Onde N_{ru} , N_{da} , N_{cu} e N_{dp} são os valores normalizados dos índices de complexidade de rugosidade, diferença de altura local, curvatura total e desvio padrão da declividade, respectivamente.

2.5.1 DESVIO PADRÃO DA DECLIVIDADE

A declividade é a primeira derivada da elevação, é a partir dela que mede-se a taxa de mudança da elevação tendo um plano horizontal como referência. O desvio padrão de declividade é um índice independente de complexidade de terreno que permite estabelecer relações com a variabilidade de quebras do terreno, de maneira que áreas planas estão representadas por baixa variação da declividade (RIOS, 2012). Esse índice é determinado pela equação:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2.6)$$

onde μ é a média da declividade, x_i os valores de declividade, e N é o número de pontos na janela móvel local (NEAGLEY; EVANS, 1980). Usualmente, move-se uma janela quadrada de 3x3 metros com um certo passo e direção sobre os dados até que toda a área desejada tenha o desvio padrão da declividade calculado (SUI et al., 2010).

2.5.2 CURVATURA TOTAL

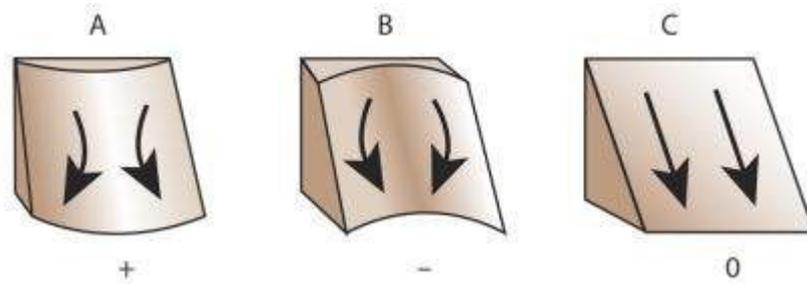
A curvatura total é a segunda derivada da elevação e é um índice calculado por meio da concavidade e convexidade do relevo (Figura 12). Identifica-se a partir dela as características físicas de uma bacia de drenagem, em um esforço para entender os processos de erosão e escoamento (HENGL, 2009).

Com o objetivo de apenas analisar a complexidade de terreno por meio do índice de curvatura total, pode-se utilizar apenas valores positivos, para tal utiliza-se a seguinte equação:

$$c = \sqrt{(r^2 + 2s^2 + t^2)} \quad (2.7)$$

onde $r = f_{xx} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$, $s = f_{xy} = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$, $t = f_{yy} = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$

Figura 12 – (A) Valores positivos indicam que a superfície é convexa em determinado ponto. (B) Valores negativos indica que a superfície é côncava. (C) Um valor zero indica que a superfície é linear.



Fonte: [ESRI \(2018\)](#)

2.5.3 DIFERENÇA DE ALTURA LOCAL

[Gao \(1998\)](#) propôs o índice de diferença de altura local que é a disparidade aritmética entre as elevações máximas e mínimas em uma janela móvel local ([Equação 2.8](#)).

$$ICT_{DAL} = H^{max} - H_{min} \quad (2.8)$$

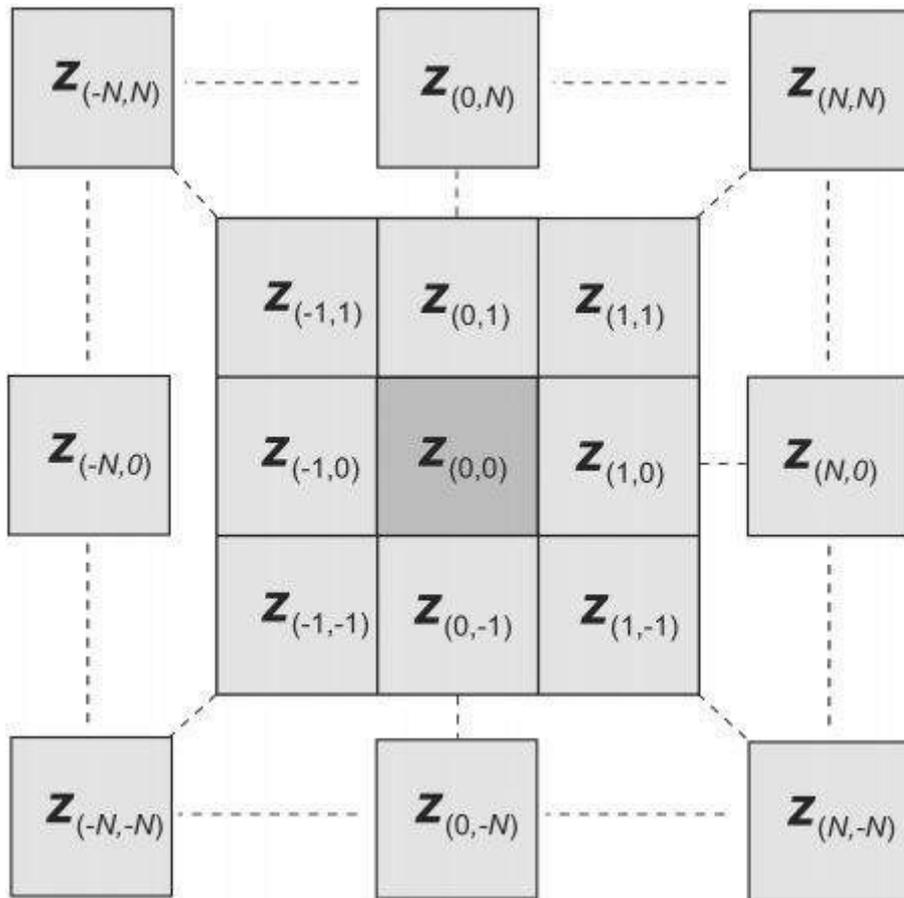
2.5.4 RUGOSIDADE

Outro índice de complexidade de terreno bastante utilizado é o de rugosidade (TRI). O valor desse índice é uma medida da variação local no terreno. O índice é calculado comparando um ponto central com seus vizinhos, tomando os valores absolutos das diferenças, e depois a média do resultado ([WILSON et al., 2007](#)).

Usando a notação da [Figura 13](#) para uma $n \times n$ janela onde $N = \frac{(n-1)}{2}$:

$$TRI_{(n)} = \frac{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N |Z_{ij} - Z_{00}|}{(n^2 - 1)} \quad (2.9)$$

Figura 13 – Uma grade de *raster* que mostra um sistema de numeração para células na janela móvel de análise, onde Z é o valor da varredura. A célula central é a origem do sistema de coordenadas local (x, y) e as posições em relação a isso são denotados por subscritos. Para simplificar a notação, usou-se $N = \frac{(n-1)}{2}$ para qualquer $n \times n$ de janela onde n pode ser qualquer inteiro ímpar menor que o número de células de menor lado do *raster*. Estes são mostrados na íntegra para uma janela 3×3 . Valores maiores de n significam que mais células são considerados na análise.



Fonte: Wilson et al. (2007)

2.5.5 SINUOSIDADE DO RIO

Além dos quatro índices recomendados por Huaxing, pode-se classificar o rio submerso dos reservatórios por meio de sua sinuosidade. A sinuosidade é a relação do comprimento do curso do rio no ponto de talvegue pela distância das extremidades do rio em linha reta. Segundo Friend e Sinha (1993) o índice de sinuosidade é dado pela Equação 2.10.

$$P = L_{cmax}/LR \quad (2.10)$$

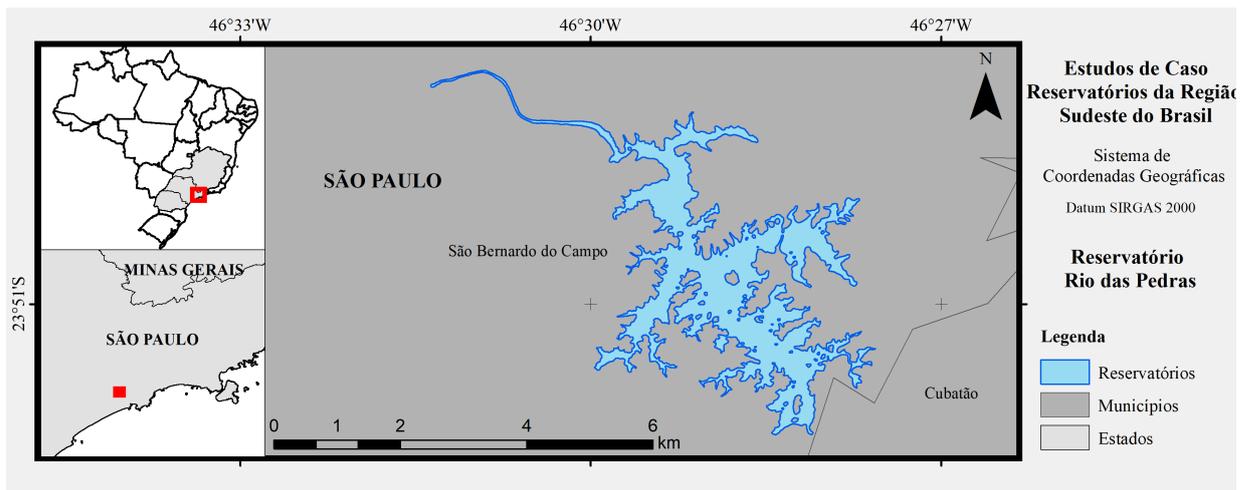
Onde P é o índice de sinuosidade, L_{cmax} é o comprimento total do rio e L_R é o comprimento total em linha reta dos dois extremos do canal do rio. Valores de índice próximo a 1 significam pouca ou nenhuma sinuosidade do canal enquanto valores maiores ou iguais a 2 determinam rios com bastante sinuosidade. Valores intermediários entre 1 e 2 caracterizam uma transição da sinuosidade.

3 ÁREAS DE ESTUDO

Os reservatórios hídricos para avaliação dos diferentes métodos de interpolação com diferentes métodos de aquisição e por fim comparação das diferentes representações de volume foram escolhidos segundo a disponibilidade dos dados. São utilizados nesse trabalho como estudo de caso os reservatórios Rio das Pedras, Água Vermelha, Chavantes, Capivara e Irapé.

3.1 RESERVATÓRIO RIO DAS PEDRAS

Figura 14 – Mapa de localização do reservatório Rio das Pedras



O reservatório Rio das Pedras (Figura 14) é formado pelo represamento do rio de mesmo nome. O fornecimento de água é possível pela mudança no curso natural da bacia do alto Tietê. As represas Rio das Pedras e Billings pertencem ao complexo da Usina Hidrelétrica Henry Borden, onde a água do Rio Pinheiros era bombeada para Billings e depois desaguava no Rio das Pedras.

Desde outubro de 1992, a operação da UHE Henry Borden vem atendendo às condições estabelecidas na Resolução Conjunta SMA/SES 03/92, de 04/10/92, atualizada pela Resolução SMA-SSE-02, de 19/02/2010, que só permite o bombeamento das águas do Rio Pinheiros para o Reservatório Billings para controle de cheias, reduzindo em 75%, aproximadamente, a energia produzida na usina hidrelétrica. Ou seja, há décadas a usina produz muito menos que sua capacidade máxima, ou apenas 200 MW, por razões ecológicas: reduzir o acúmulo de poluição na Represa Billings, direcionando o fluxo da água e a poluição em direção ao interior do estado.

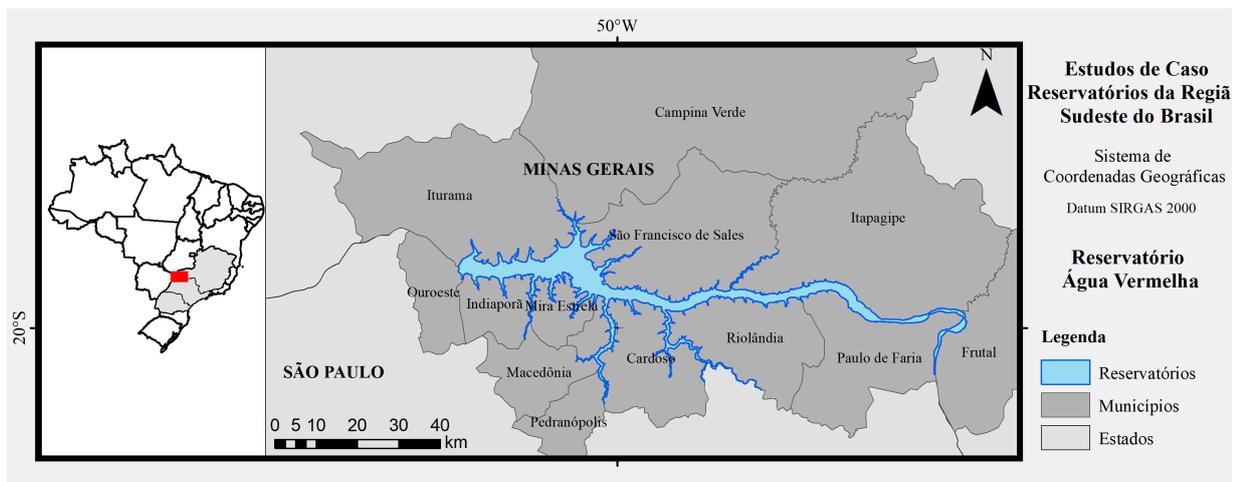
A UHE Henry Bordem localiza-se no sopé da Serra do Mar em Cubatão – SP. Teve o início de sua construção no ano de 1926 pela finada empresa canadense THE SÃO PAULO TRAMWAY, LIGHT & POWER CO. Hoje é operada pela EMAE - Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. e possui a capacidade instalada de geração de 899 MW, para uma vazão de $157 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 2 – Caracterização do reservatório do Rio das Pedras

Rio Represado	Rio das Pedras
Localização	Cubatão - SP
Bacia Hidrográfica	Alto Tietê
Coordenadas Geográficas	23S 51'51" / 46W 28'08"
Área Alagada	30 km^2
Proprietário	EMAE
Período de construção	1926 a 1950
Capacidade de geração	889 MW
Altura (queda)	720 m
NA Máximo Normal	727,60 m
NA Mínimo Operacional	722,20 m

3.2 RESERVATÓRIO ÁGUA VERMELHA

Figura 15 – Mapa de localização do reservatório Água Vermelha



A UHE Água Vermelha ou UHE José Ermírio de Moraes (Figura 15) é formada pelo represamento do Rio Grande. A Bacia Hidrográfica do Rio Grande situa-se na Região Sudeste do Brasil, na Região Hidrográfica Paraná que, em conjunto com as Regiões

Hidrográficas Paraguai e Uruguai, compõe a Bacia do Prata. A dominialidade dos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Grande está dividida entre a União (12,37%) e os Estados de Minas Gerais (51,40%) e São Paulo (36,23%).

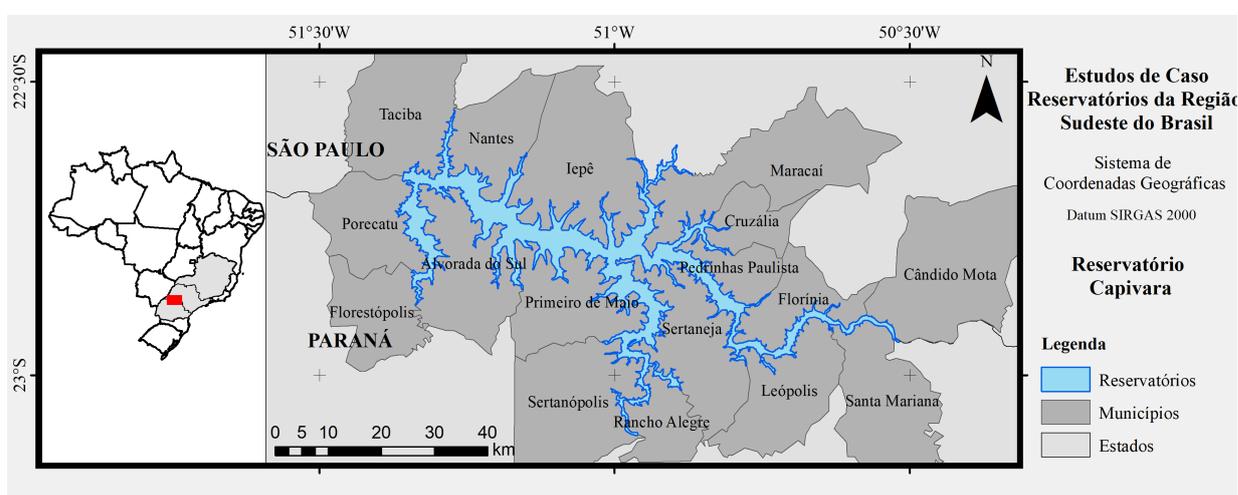
O reservatório Água Vermelha localiza-se entre os municípios Iturama (MG) e Ouroeste (SP). Sua construção foi realizada no período de 1973 a 1979 e hoje é operada pela empresa AES Tietê. Possui capacidade instalada de 1386 MW e vazão máxima de $2.102 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 3 – Caracterização do reservatório Água Vermelha

Rio Represado	Rio Grande
Localização	Iturama - MG e Ouroeste - SP
Bacia Hidrográfica	Paraná
Coordenadas Geográficas	19S 50' 38" / 50W 20' 07"
Área Alagada	647 km^2
Proprietário	AES Tietê
Período de construção	1973 a 1979
Capacidade de geração	1386 MW
Altura (queda)	67 m
NA Máximo Normal	383,30 m
NA Mínimo Operacional	373,30 m

3.3 RESERVATÓRIO CAPIVARA

Figura 16 – Mapa de localização do reservatório Capivara



A UHE Capivara (Figura 16) é formado pelo represamento do rio Paranapanema, o qual inunda 27 municípios dos estados do Paraná e São Paulo. Compreendida nas regiões do sudeste do estado de São Paulo e norte do Paraná, está sujeita as variações climáticas de ambas as regiões, em uma área de transição de zonas climáticas, conferindo-a características próprias e diversas das demais bacias.

O reservatório Capivara localiza-se entre os municípios Taciba - SP e Porecatu - PR. Sua construção foi realizada pela Companhia Energética de São Paulo (CESP) no período de 1970 a 1978 e atualmente a concessão da usina pertence a empresa Rio Paranapanema Energia S.A. do grupo chinês CTG Brasil. Possui capacidade instalada de 619 MW e vazão média de 925,8 m^3/s .

Tabela 4 – Caracterização do reservatório Capivara

Rio Represado	Rio Paranapanema
Localização	Taciba - SP e Porecatu - PR
Bacia Hidrográfica	Paraná
Coordenadas Geográficas	22S 39' 37" / 51W 21' 29"
Área Alagada	609,73 km^2
Proprietário	Rio Paranapanema Energia S.A.
Período de construção	1970 a 1978
Capacidade de geração	619 MW
Altura (queda)	60 m
NA Máximo Normal	334,00 m
NA Mínimo Operacional	321,00 m

3.4 RESERVATÓRIO CHAVANTES

Assim como a represa Capivara, o reservatório Chavantes (Figura 17) é formado pelo represamento do Rio Paranapanema e pertence a Bacia do Rio Paraná. Essa barragem funciona como principal meio de regularização da vazão do rio, o que contribui para o controle de cheias e assegura o uso de água para irrigação e abastecimento de água da região ribeirinha, além da produção de energia elétrica.

A UHE Chavantes localiza-se entre os municípios Chavantes - SP e Ribeirão Claro - PR. Sua construção foi concluída em 1971 com capacidade instalada de 414 MW e vazão média de 343,8 m^3/s . Atualmente é gerenciada pelo grupo chinês CTG Brasil.

Figura 17 – Mapa de localização do reservatório Chavantes

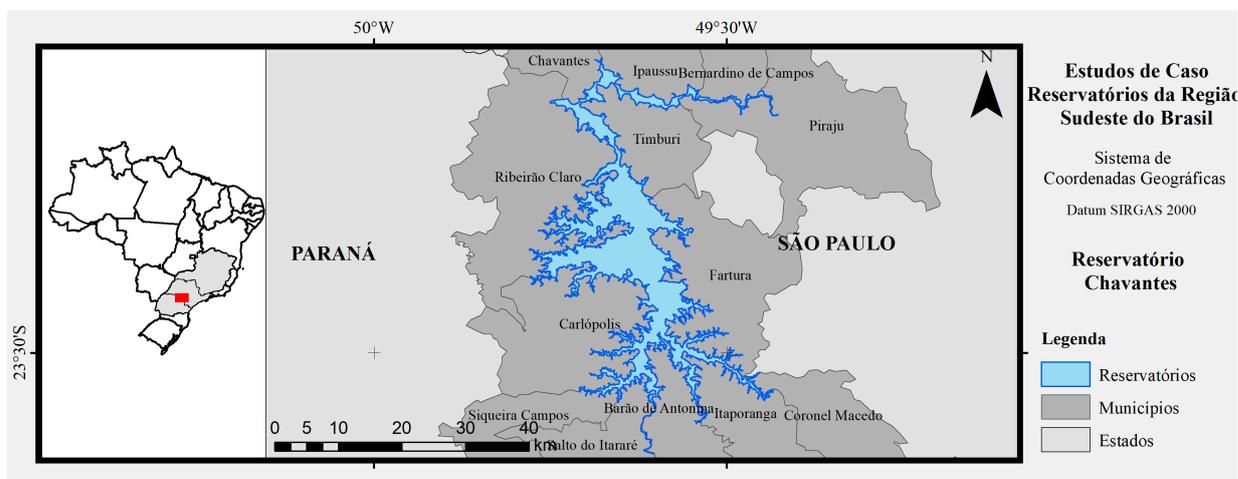


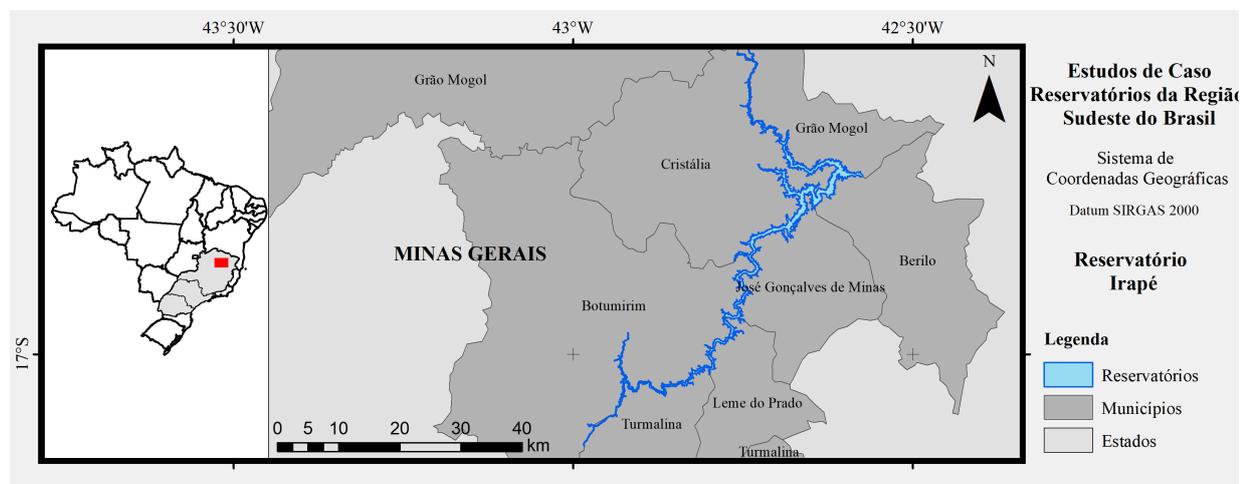
Tabela 5 – Caracterização do reservatório Chavantes

Rio Represado	Rio Paranapanema
Localização	Chavantes - SP e Ribeirão Claro - PR
Bacia Hidrográfica	Paraná
Coordenadas Geográficas	23S 07' 44" / 49W 43' 54"
Área Alagada	428,34 km^2
Proprietário	Rio Paranapanema Energia S.A.
Período de construção	1959 a 1971
Capacidade de geração	414 MW
Altura (queda)	83 m
NA Máximo Normal	474,00 m
NA Mínimo Operacional	465,23 m

3.5 RESERVATÓRIO IRAPÉ

O reservatório Irapé (Figura 18) é formado pelo represamento do rio Jequitinhonha. A represa possui uma área de $70,315 km^2$, sendo $66,319 km^2$ em Minas Gerais e $3,996 km^2$ na Bahia. Limita-se a norte com a bacia do rio Pardo, a oeste com a bacia do rio São Francisco, ao sul com a bacia do rio Doce, a sudeste com a bacia do rio Mucuri e de pequenas bacias independentes e a leste desemboca no Oceano Atlântico.

Figura 18 – Mapa de localização do reservatório Irapé



A UHE Irapé está localizada entre os municípios Berilo e Grão Mogol no estado das Minas Gerais. Teve suas operações iniciadas no ano de 2006 e é gerenciada pela empresa estadual Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. A usina é a mais alta do Brasil com 208 metros de altura tendo uma capacidade instalada de 360 MW.

Tabela 6 – Caracterização do reservatório Irapé

Rio Represado	Rio Jequitinhonha
Localização	Berilo - MG e Grão Mogol - MG
Bacia Hidrográfica	Alto do Rio Jequitinhonha
Coordenadas Geográficas	16S 44' 15" / 42W 34' 30"
Área Alagada	70,32 km ²
Proprietário	CEMIG
Período de construção	2002 a 2005
Capacidade de geração	360 MW
Altura (queda)	138,20 m
NA Máximo Normal	510,00 m
NA Mínimo Operacional	493,50 m

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta dos dados batimétricos foi realizada nos cinco reservatórios: Água Vermelha, Chavantes, Capivara, Irapé e Rio das Pedras. Os levantamentos da área molhada dos reservatórios foram feitos exclusivamente com batimetria multifeixe (resolução de 1 m), com exceção do reservatório Rio das Pedra que foram adquiridas também com batimetria monofeixe com o objetivo de comparar as duas técnicas batimétricas.

4.1 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS

4.1.1 CONJUNTO MONOFEIXE

O ecobatímetro monofeixe utilizado foi o Echotrac CV100-DF (Figura 19) da *Odom Hydrographic Systems Inc.*, hoje pertencente à *Teledyne*. Este pode utilizar frequências de 12 a 200 kHz, com capacidade de aquisição em colunas d'água de até 200 metros de profundidade e com velocidades do som variando de 1300 a 1600 metros por segundo (ODOM, 2008). O transdutor utilizado possui ângulo de abertura de 8° e frequências de 33 e 200 kHz.

Figura 19 – Ecobatímetro Echotrac CV100-DF



Fonte: Odom (2008)

A configuração e comunicação do equipamento com o computador é realizada pelo software *eChart* da Odom. O *software* também permite o ajuste da frequência, velocidade do som, a aplicação de filtros de profundidade, dentre outros.

Além do ecobatímetro foram utilizadas duas antenas GPS modelo VS330 da *Hemisphere* que possui correção diferencial via satélite em tempo real com precisão horizontal de aproximadamente 0,7 m. Para compensar a movimentação que embarcação

faz durante a aquisição foi utilizado o Ekinox-E da *SBG Systems*, e para medir a velocidade do som na água utilizou-se o *Digibar Pro* da *Odom Hydrographic Systems Inc.*

4.1.2 CONJUNTO MULTIFEIXE

Foi utilizado um conjunto diferente de equipamentos para cada reservatório sondado (Figura 20). A Tabela 7 e Tabela 8 caracterizam os equipamentos utilizados em cada um dos reservatórios.

Figura 20 – Barco equipado com o multifeixe Reson SeaBat 7125.



Tabela 7 – Relação dos ecobatímetros utilizados na aquisição de dados dos reservatórios indicados e suas resoluções verticais

Reservatório	Ecobatímetro Multifeixe	Intervalo de Frequência	Abertura Ângular dos Feixes
Água Vermelha	SeaBat 7125	200 - 420 kHz	0,5 x 1°
Irapé	SeaBat T50-P	200 - 420 kHz	0,5 x 0,5°
Capivara	Odom MB1	200 kHz	1,5 x 2°
Chavantes	Odom MB2	190 - 400 Khz	1 x 1,5°

Tabela 8 – Relação dos compensadores de ondas utilizados na aquisição de dados dos reservatórios indicados

Reservatório	Compensador de Ondas	Resolução Roll e Pitch	Resolução Heave
Água Vermelha	Applanix WaveMaster II	0,02°	2,5 cm
Irapé	SBG Ekinox-E	0,03°	2,5 cm
Capivara	TSS DMS-05	0,03°	5,0 cm
Chavantes	Applanix WaveMaster	0,03°	2,5 cm

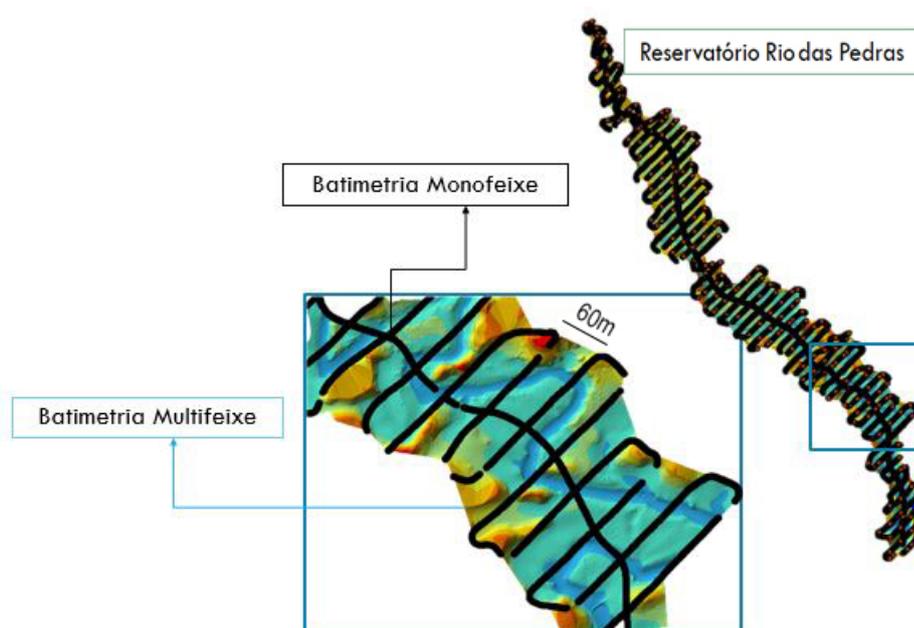
4.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS

4.2.1 RESERVATÓRIO RIO DAS PEDRAS

O levantamento batimétrico do reservatório de Rio das Pedras foi compreendido entre os dias 13 e 19 de Outubro de 2017. Os trabalhos foram iniciados com o levantamento nas proximidades da Barragem do Rio das Pedras e seguindo até as suas áreas de remanso, com o levantamento multifeixe em todas as áreas do reservatório e o levantamento monofeixe com espaçamento transversal de 60 metros. A [Figura 21](#) mostra as linhas da batimetria monofeixe sobrepondo a batimetria multifeixe.

Na aquisição com a tecnologia multifeixe foi utilizado o *software PDS2000* versão 4.3.1 com o ecobatímetro *SeaBat T20-P* e frequência central de 420 kHz, na tecnologia monofeixe foi adquirido pelo *software Hypack* com frequência central de 200 kHz.

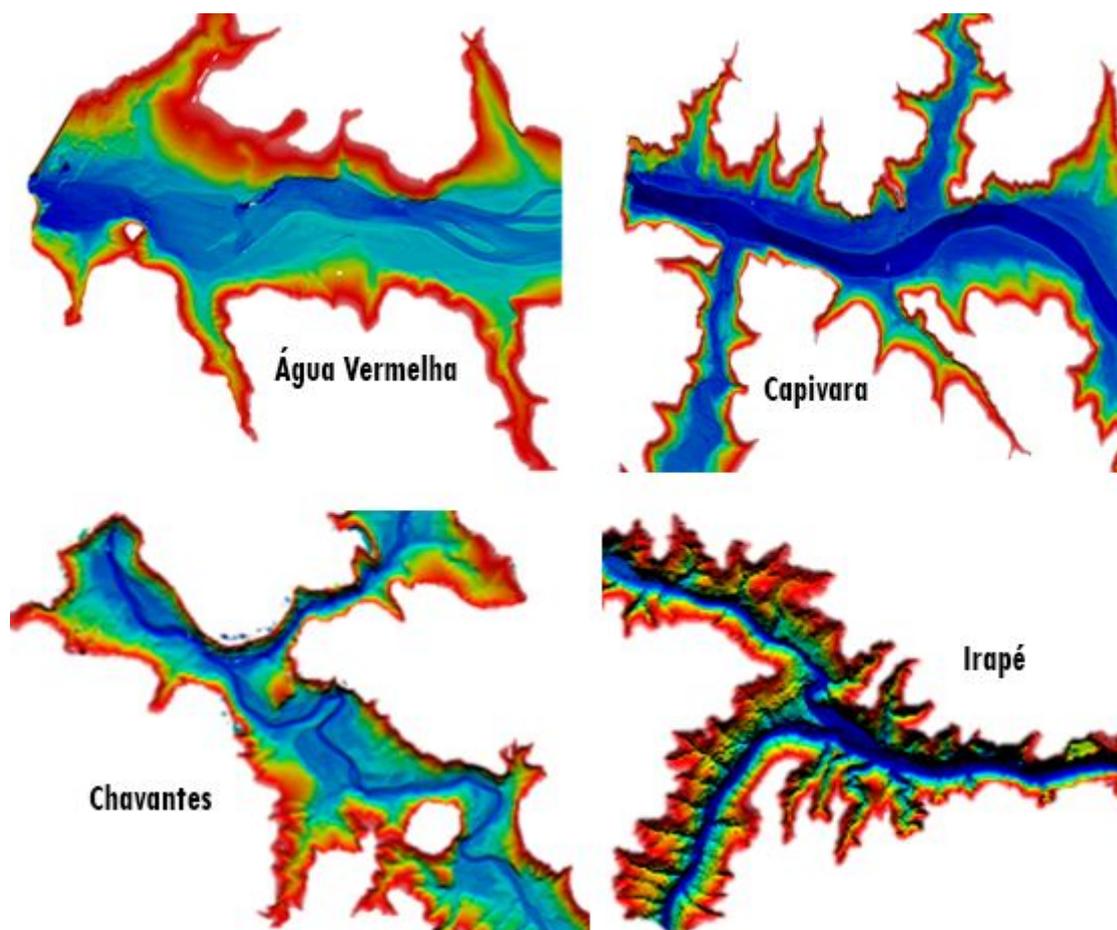
Figura 21 – Batimetria Multifeixe e as linhas da batimetria monofeixe no reservatório Rio das Pedras



4.2.2 RESERVATÓRIOS ÁGUA VERMELHA, CAPIVARA, CHAVANTES E IRAPÉ

O levantamento nos demais reservatórios foram realizadas apenas com a tecnologia multifeixe, com resolução espacial de 1 m^2 . A Figura 22 mostra o *grid* das batimetrias de cada reservatório.

Figura 22 – Batimetria Multifeixe nos reservatórios Água Vermelha, Capivara, Chavantes e Irapé



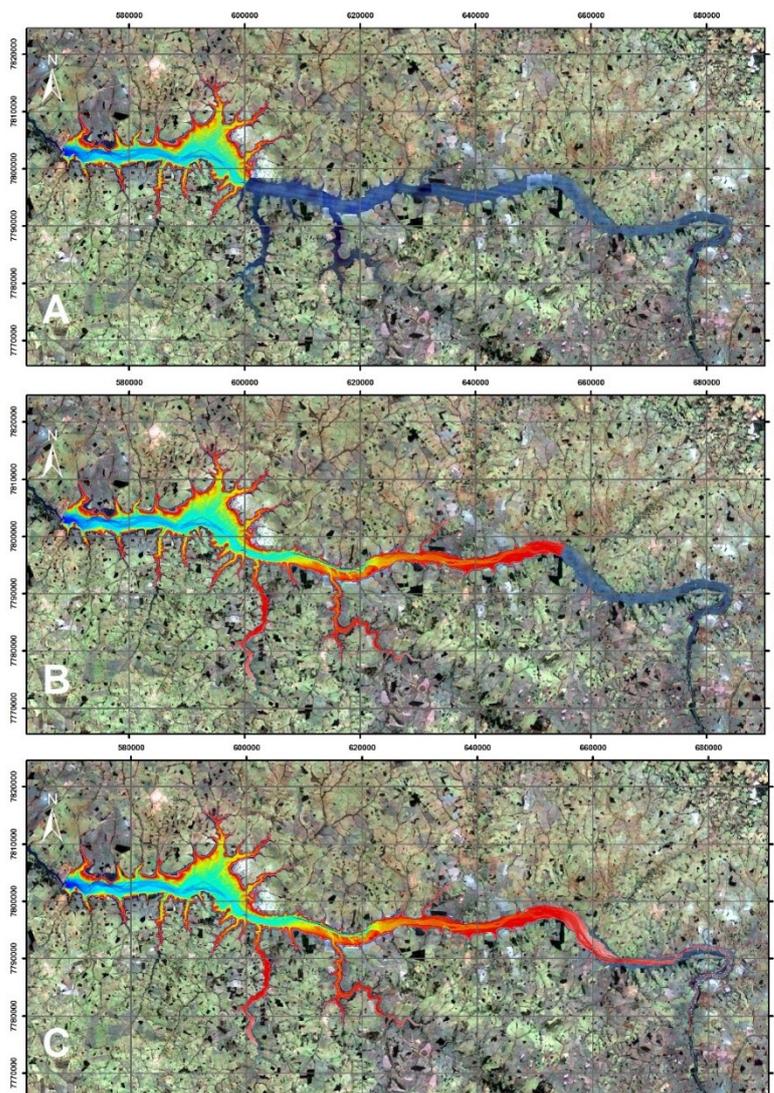
4.2.2.1 RESERVATÓRIO ÁGUA VERMELHA

O levantamento batimétrico do reservatório da UHE Água Vermelha foi compreendido em duas campanhas, sendo a primeira entre os dias 14 de Janeiro e 06 de Fevereiro 2016 e posteriormente sua finalização no período de 17 a 28 de Abril. Em áreas rasas e áreas que ofereciam riscos maiores às embarcações, foi empregado equipamento mais compacto e que possuía maior rendimento em tais profundidades como o *Odom MB2*. Para águas mais profundas (canal principal e áreas adjacentes), foram designados equipamentos mais robustos, com maior energia e alta precisão, *Reson 7125* e *Reson 7101*.

O softwares utilizados na aquisição dos dados para o conjunto multifeixe *Odom MB2* e *Reson 7101*, foi o *PDS2000* versão 4.0.1 produzido pela Teledyne, e para o conjunto multifeixe *Reson 7125*, o *software QINSY* versão 8.1 produzido pela *QPS*.

Os trabalhos foram iniciados com o levantamento partindo na região do reservatório próximo da cidade de Cardoso/SP, com prosseguimento em direção a UHE Água Vermelha. Com o levantamento completo em tal direção, iniciaram-se os trabalhos na porção central e posteriormente na porção montante do reservatório (Figura 23). A segunda campanha compreendeu o levantamento de locais que não conseguiram ser mapeados com os equipamentos e embarcações previamente utilizados, como o extremo oposto à UHE Água Vermelha, e algumas pontas de contribuintes.

Figura 23 – (A) Levantamento da porção jusante até a parte central do reservatório; (B) Levantamento da área central à montante do reservatório; (C) Levantamento da porção à montante do reservatório

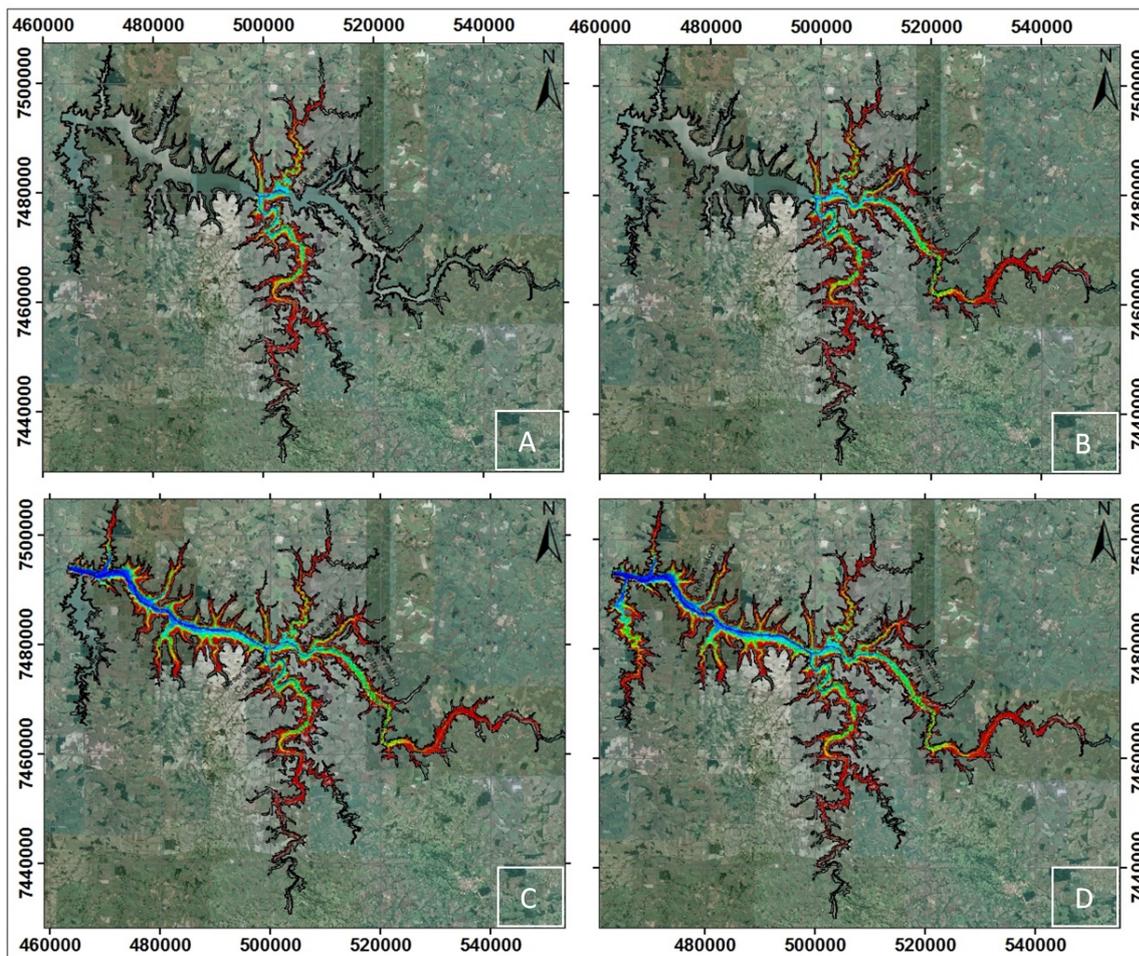


4.2.2.2 RESERVATÓRIO CAPIVARA

O levantamento batimétrico do reservatório de Capivara foi compreendido entre os dias 8 de setembro e 21 de outubro de 2015. O mapeamento começou pelas áreas rasas (mais a montante) no período de chuvas e com o nível da água mais alto. Portanto, iniciou-se os trabalhos na porção mais à montante do Rio Tibagi, principal afluente e localizado na margem esquerda do reservatório, e prosseguiu-se sentido jusante até seu completo levantamento, onde se encontra com Rio Paranapanema. Em sequência, a parte central do Rio Paranapanema foi levantada, devido à facilidade na logística, por estar mais perto à base da equipe de campo (Figura 24).

Os conjuntos multifeixes utilizados foram o *Odom MB1* e o *Reson 7101*, com o *PDS2000* versão 3.9.1.

Figura 24 – (A) Levantamento do Rio Tibagi, da parte central do Rio Paranapanema e do Rio São Mateus; (B) Levantamento montante Rio Paranapanema até a parte central; (C) Levantamento parte central do Rio Paranapanema à UHE Capivara; (D) Levantamento Ribeirão Vermelho

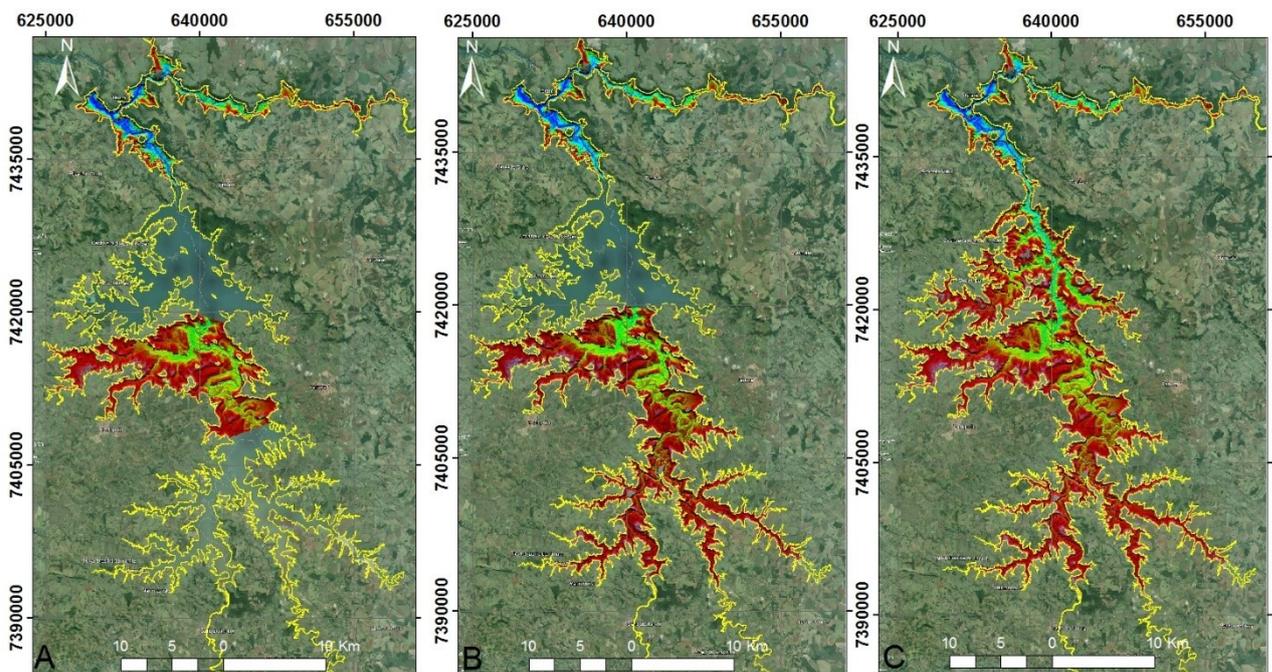


4.2.2.3 RESERVATÓRIO CHAVANTES

O levantamento batimétrico do reservatório de Chavantes foi compreendido entre os dias 19 de Outubro e 9 de Dezembro de 2015. A metodologia adotada nos levantamentos, foi o mapeamento da porção central em um primeiro instante, pela facilidade apresentada, além do levantamento da parte jusante e do braço do Rio Paranapanema. Em sequência, a área à montante foi levantada, devido à elevação do nível do reservatório, realizando o mapeamento dos quatro braços mais representativos, ao sul da região. Por fim, o levantamento da parte central-jusante do reservatório foi realizado de modo a complementar os trabalhos de batimetria de UHE Chavantes (Figura 25).

Os equipamentos aplicados no levantamento da área molhada do reservatório também foram utilizados de forma que fornecessem a melhor eficácia durante os trabalhos. O equipamento modelo Odom MB2 foi empregado no levantamento das áreas mais rasas, por ser um equipamento mais sucinto e versátil, portanto, mais seguro em aquisições próximas as margens, por serem áreas mais sujeitas a colisões em restos de vegetações e outros obstáculos. Por outro lado, o modelo *Reson 7125* foi utilizado nas áreas mais profundas do reservatório, devido à alta produtividade que provém aliada a excelente qualidade dos dados. Para os dois modelos utilizou-se o *software PDS2000* versão 4.0.

Figura 25 – (A) Levantamento na parte central e na porção jusante do reservatório (Rio Paranapanema); (B) Levantamento montante do reservatório até a parte central; (C) Levantamento parte central-jusante do reservatório da UHE Capivara

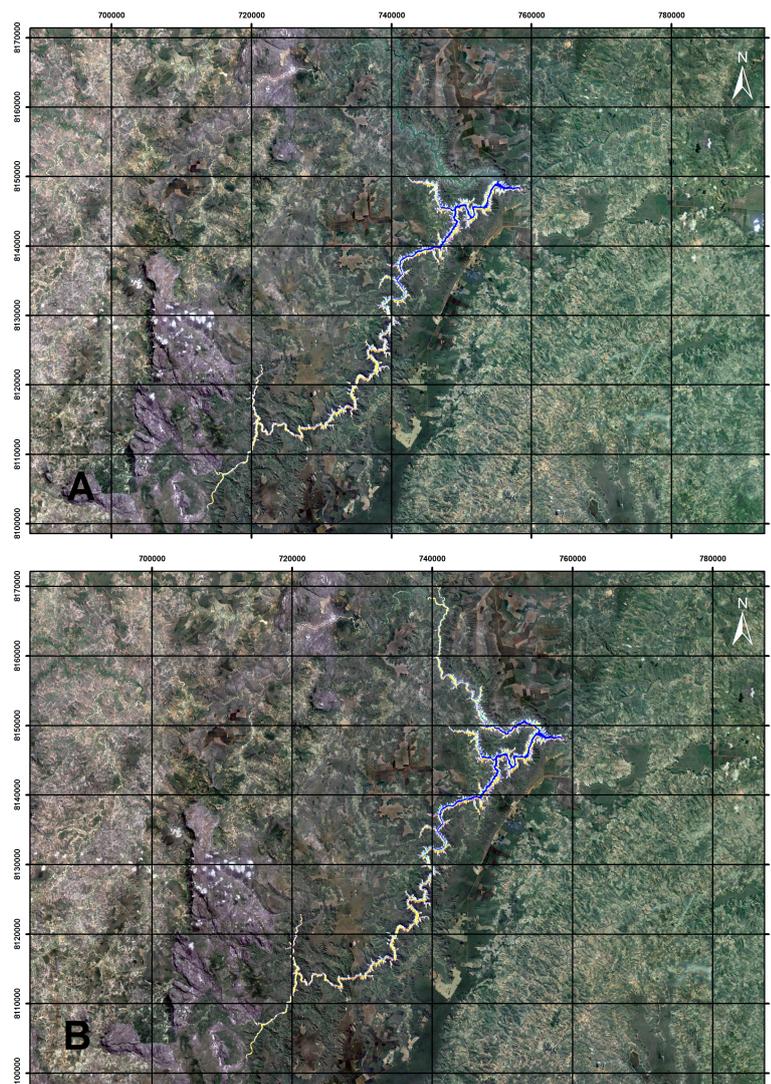


4.2.2.4 RESERVATÓRIO IRAPÉ

O levantamento batimétrico do reservatório de UHE Irapé foi compreendido entre os dias 16 e 23 de março de 2016. A metodologia adotada nos levantamentos do reservatório foi o mapeamento do corpo principal (braço oeste) do reservatório até as proximidades da usina e em seguida o levantamento do braço norte do reservatório (Figura 26).

Pelas características do reservatório, de margens bem encaixadas e águas muito profundas (180 m), o levantamento foi relativamente rápido e fácil de ser realizado. Devido a facilidade, utilizou-se apenas o equipamento *SeaBat T50-P* que possui alta eficiência e é capaz de proporcionar uma alta precisão além de detalhar muito bem as feições presentes abaixo da linha d'água mesmo em grandes profundidades. O *software* empregado na aquisição foi o *PDS2000* versão 4.0.1.

Figura 26 – (A) Levantamento do corpo principal (braço oeste); (B) Levantamento do braço norte



4.2.3 AMARRAÇÃO ALTIMÉTRICA

O levantamento batimétrico, por si só, realiza medições de profundidade local da lâmina d'água, em um referencial arbitrário. Para a conversão das profundidades sondadas para altitude é necessário que estes dados sejam amarrados à um Referencial Altimétrico, seja ele um referencial local ou o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Adotou-se o SGB como referencial altimétrico, em que se realizou a amarração via posicionamento GNSS das estações fluviométricas, por sua vez amarradas à Referência de Nível (RN) do reservatório.

A amarração se dá pela medição do nível da água do reservatório no momento em que se executa o levantamento batimétrico. Esta medição foi realizada pela instalação de réguas linimétricas ao longo do reservatório, e pelo monitoramento realizado pela própria Concessionária do empreendimento, em todas as réguas existentes.

A distribuição quantitativa das réguas linimétricas ao longo dos reservatórios ocorre principalmente em função das mudanças das características morfológicas locais destes corpos hídricos. A inserção de uma nova seção de réguas é sempre necessária quando as áreas em sondagem distam muito do monitoramento existente, realizado normalmente no barramento dos reservatórios, em áreas de deságue de contribuintes significativos e em áreas próximas a outros barramentos, que possibilitam uma variação constante na vazão de fluente nas áreas de remanso.

4.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados é a etapa que sucede os levantamentos de campo e englobam a remoção de *outliers* e ajustes dos dados batimétricos, o ajuste dos dados de monitoramento de nível e a redução dos dados para cotas ortométricas.

4.3.1 DADOS BATIMÉTRICOS

Os softwares utilizados no processamento dos dados foram os mesmos empregados na aquisição. Para os equipamentos multifeixes foram utilizados os *softwares PDS2000* e *QINSy*. Para o conjunto monofeixe, foi utilizado o *softwares Hypack*. Todos possuem a mesma utilidade, operam com funcionalidades equivalentes e estão inseridos tanto na etapa de aquisição dos dados quanto de processamento, sendo separados por módulos: configuração do projeto, aquisição dos dados e processamento.

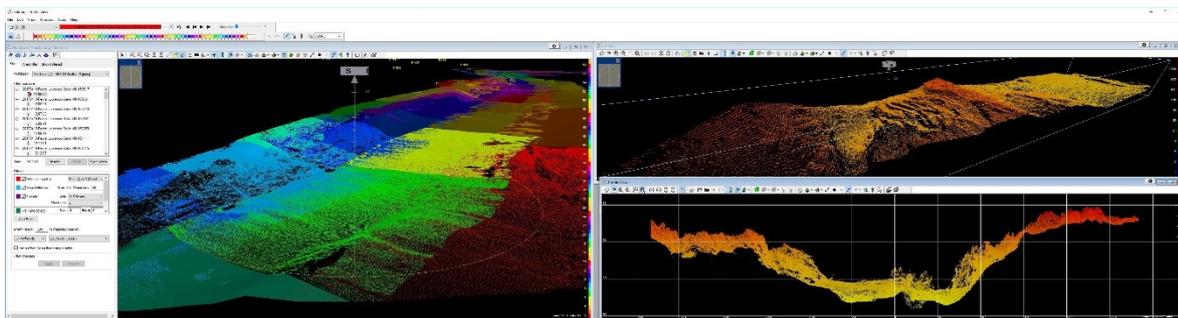
No módulo de configuração são estabelecidos os parâmetros geodésicos, os dispositivos que serão utilizados (i. e., GPS, compensador de ondas e transdutores), e os offsets de cada um dos dispositivos para um ponto de referência previamente determinado.

A interface de aquisição, utilizada nos levantamentos batimétricos, é responsável pelas configurações de posicionamento e calibração aplicadas. Durante o levantamento, as

informações de todos os dispositivos são integradas, formando em tempo real uma malha (*grid*) do Modelo Digital de Terreno que ilustra a área que está sendo coberta. Ainda é possível, nesta etapa, a utilização de filtros que eliminam ruídos e facilitam o trabalho de limpeza dos dados.

Os dados da batimetria são tratados (Figura 27) antes de serem utilizados na elaboração da malha final de pontos para a confecção do Modelo Digital de Terreno, a ser realizado no módulo de processamento de cada software (que oferecem uma vasta quantidade de ferramentas e utilitários), tendo como objetivo corrigir e eliminar dados espúrios e “*outliers*”, evitando que pontos “puxem” as curvas para cima ou para baixo durante a geração do Modelo Digital Terreno. Para a eliminação dos ruídos, são aplicados filtros, além da limpeza manual que permite uma interpretação mais qualitativa dos dados. Ruídos são resultantes, em geral, da interação da onda acústica com bolhas, vegetações submersas, reflexões múltiplas e outros fatores inerentes ao levantamento e aos equipamentos.

Figura 27 – Processamento e correção de uma linha multifeixe



4.3.2 DADOS DE NÍVEL

Os dados de monitoramento de nível de água dos reservatórios foram obtidos por *DataLoggers* da fabricante HOB0, com os modelos U20 e U20L, os quais foram processados posteriormente com o software *HOB0ware PRO* versão 3.7.5. Os dados são inseridos no software supracitado, juntamente com aqueles da compensação atmosférica, sendo gerado um gráfico com a variação do nível no período em que o dispositivo esteve inserido na água. Dados fora da tendência (*outliers*) são retirados e o resultado é exportado no formato de arquivo ASCII com data, horário e cota. Outras informações também podem ser visualizadas em formato gráfico como a pressão atmosférica e a temperatura de cada medição.

4.3.3 REDUÇÃO DA PROFUNDIDADE A COTA ORTOMÉTRICA

A redução das profundidades mensuradas às cotas ortométricas ocorre por meio da correlação das mesmas com a cota do nível da água observada na estação monitorada através do *DataLogger* instalado no barramento do empreendimento e das réguas instaladas ao longo do reservatório. O arquivo de monitoramento de nível é inserido nos softwares de processamento de dados batimétricos, que por sua vez, realizam de forma automática a redução das profundidades para cotas ortométricas de acordo com a data e hora da sondagem.

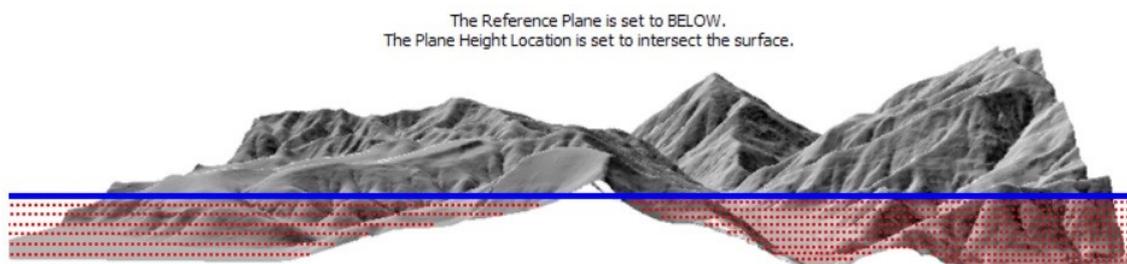
4.4 INTERPOLAÇÃO DOS DADOS E CÁLCULO DO VOLUME

Após a filtragem e redução dos dados batimétricos, é gerada uma malha de pontos com coordenadas geográficas latitude e longitude e cotas ortométricas. Essa malha de pontos é inserida no software *Arcgis Pro 2.2*, onde será utilizada a extensão *3D Analyst tools* que engloba as ferramentas de interpolação para o método TIN e para o método *Topo to Raster*, que permitem gerar os MDTs com base dos pontos cotados.

A partir do MDT é possível calcular o volume, ainda no software *Arcgis*, por meio da ferramenta *Surface Volume*. Essa ferramenta calcula a área projetada, a área da superfície e o volume com relação a uma altitude base ou a um plano de referência. A superfície pode ser uma matriz, TIN, ou outro modelo de elevação. Os resultados são gerados em um arquivo de texto com as informações de cota, área e volume.

É importante determinar se os cálculos serão realizados acima ou abaixo do plano de referência. Quando se define que os cálculos serão realizados abaixo do plano de referência, a área projetada e a área da superfície são calculadas no intervalo entre a superfície do MDT e a altitude desejada ([Figura 28](#)).

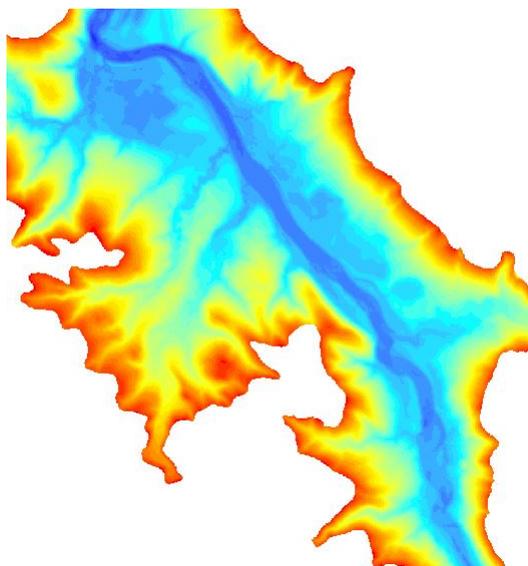
Figura 28 – Plano de referência no cálculo de volume



Inicialmente, o cálculo do volume dos reservatórios foi realizado utilizando o MDT gerado pela ferramenta *Topo to Raster* a partir de uma cota de interesse com plano de referência definido como “abaixo”. Utilizou-se a ferramenta *Topo to Raster* inserindo um shape do polígono do contorno do reservatório e a malha de pontos da batimetria

gerando-se o produto em formato matricial ou raster (Figura 29). Como nível de referência escolheu-se o nível mínimo normal dos reservatórios, nível esse que compreende o mínimo de água que o reservatório deve ter para que continue tendo a função para o qual foi construído.

Figura 29 – Raster gerado pelo ferramenta *Topo to Raster* do reservatório de Chavantes



Após calcular o volume dos cinco reservatórios adquiridos pela técnica multifeixe extraiu-se seções equidistantes dos rasters obtidos com o objetivo de simular uma aquisição batimétrica por meio da técnica monofeixe. O espaçamento máximo entre as seções extraídas foi calculado a partir da Equação 2.2 descrita na resolução conjunta da ANA/ANEEL. A Tabela 9 apresenta o valor de espaçamento máximo entre seções permitido para cada reservatório.

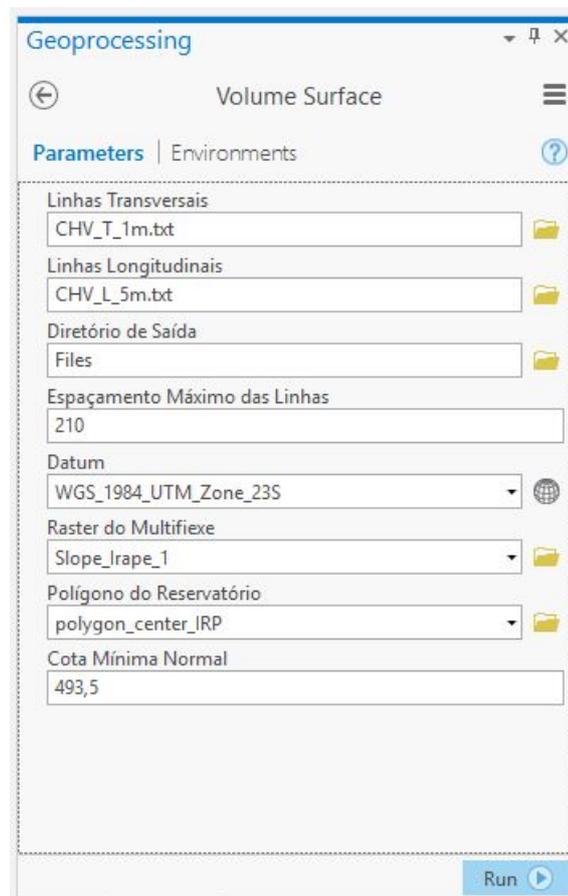
Tabela 9 – Equidistância máxima permitida das seções topobatimétricas

Reservatório	Espaçamento Máximo entre Seções (m)
Rio das Pedras	365
Água Vermelha	210
Irapé	100
Capivara	140
Chavantes	205

Com base no espaçamento máximo permitido, criou-se um *script* em *Python* e executado no ArcGis PRO 2.2. No *script* (Figura 30) é necessário inserir as seções transversais, seções longitudinais, informar uma pasta de saída de dados, inserir o espaçamento máximo das seções, informar o Sistema de Coordenadas onde o reservatório está localizado, inserir

o *raster* gerado pela malha de pontos do multifeixe, inserir o polígono do contorno do reservatório e informar a cota de referência para o cálculo de volume. Para fins de cálculos estatísticos, o espaçamento máximo escolhido para todos os reservatórios foi de 210 metros, independente dos valores encontrados utilizados na [Equação 2.2](#) e mostrados na [Tabela 9](#). Com exceção do reservatório Rio das Pedras que foi utilizado o espaçamento máximo calculado pela equação da resolução ANA/ANEEL devido a algumas características exclusivas desse reservatório e quem serão descritas nos resultados dessa dissertação.

Figura 30 – Script desenvolvido em *Python* e executado no *ArcGis Pro*



O script executa os seguintes passos:

- Passo 1: Cria uma tabela em formato *ascii* com as coordenadas dos pontos inicial e final das linhas transversais e longitudinais. As linhas foram criadas no software *Hypack* com o espaçamento de um metro e salvas no formato *lnw*.
- Passo 2: utiliza-se a ferramenta *XYToLine* do *ArcGis* para transformar as coordenadas da tabela do Passo 1 em linhas no formato *shape*.
- Passo 3: utiliza-se a ferramenta *PairwiseIntersect* para excluir pedaços das linhas que se encontram fora do polígono do contorno do reservatório.

- Passo 4: a partir de um loop utiliza-se a ferramenta *Select* para criar shapes de linhas equidistantes que tem o espaçamento variando de 5 metros até espaçamento máximo digitado no script.
- Passo 5: cria-se novos shapes a partir das linhas dos shapes gerados no passo 4 que são deslocadas em cinco metros numa mesma direção. O processo se repete até que todas as seções se desloquem, voltando à posição inicial.
- Passo 6: após gerar diversos shapes de linhas com diversos espaçamentos e deslocamentos, utiliza-se a ferramenta *ExtractByMask* para extrair do raster do multifeixe seções de acordo com cada shape de linha gerado. Os produtos gerados nesse passo são rasters com informações contendo o mesmo espaçamento dos shapes de linhas.
- Passo 7: utiliza-se a ferramenta *RasterToPoint* para converter cada *raster* criado no Passo 6 para shapes de pontos contendo informação das profundidades reduzidas em cotas.
- Passo 8: utiliza-se as ferramentas *CreateTin* e *TopoToRaster* para fazer a interpolação dos pontos extraídos no Passo 7. Nesta etapa cria-se modelos digitais de terreno por meio da interpolação TIN e *Topo to Raster* para cada shape de ponto gerado.
- Passo 9: a partir das superfícies geradas no Passo 8 calcula-se o volume de cada MDT por meio da ferramenta *SurfaceVolume*.
- Passo 10: cria-se uma tabela em *Excel* contendo o volume médio para todas as superfícies de cada espaçamento (Tabela 10).

Tabela 10 – Produto final gerado pelo *script*

Espaçamento entre seções (m)	Volume médio (hm^3)
5	4854,97
10	4854,92
15	4854,81
...	...
210	4580,59

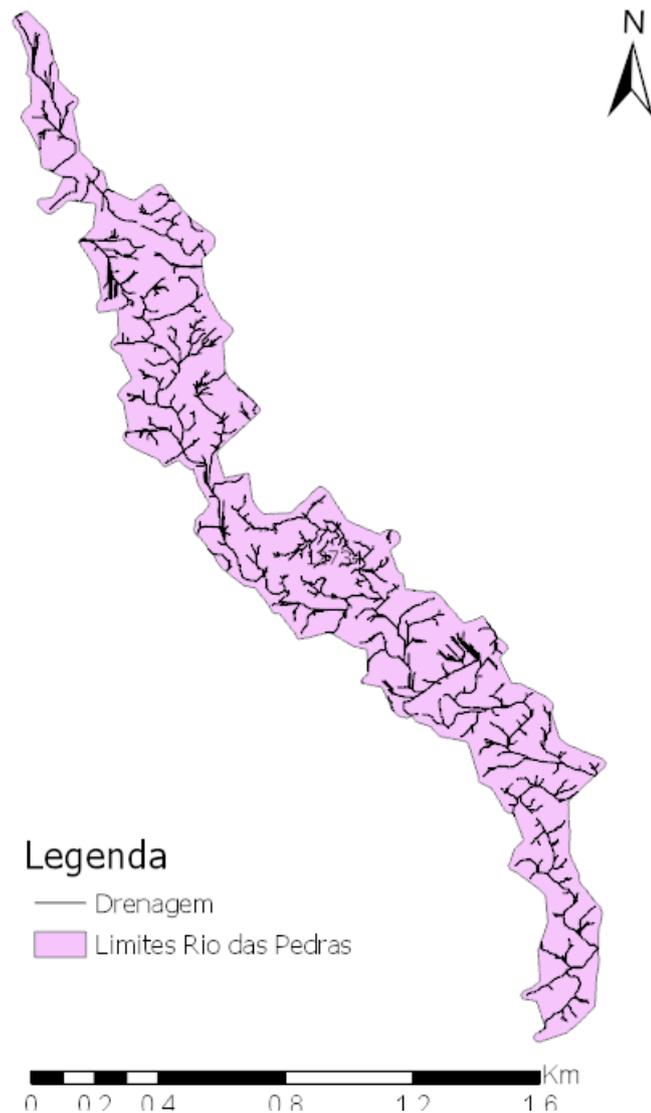
Com as informações do volume médio para cada espaçamento foi possível criar um gráfico de espaçamento das seções *versus* volume médio. A partir do gráfico e das informações geradas realizou-se a regressão quadrática dos dados por meio do *software MiniTab*.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE INTERPOLADORES

Para observar as diferenças entre os interpoladores *Topo to Raster* e *TIN*, foram utilizados dados do reservatório Rio das Pedras com espaçamentos de 5, 100 e 210 metros e o *software ArcGis Pro*.

Na interpolação por *Topo To Raster* foram gerados dois MDTs para cada um dos três espaçamentos. Para o primeiro MDT aplicou-se além dos pontos de profundidade, um *shape* de linha representando as drenagens do reservatório (Figura 31), essa interpolação será denominada aqui por “*Topo to Raster Stream*”, e o segundo MDT, denominado “*Topo to Raster Default*”, utilizou-se apenas o *shape* de pontos como dado de entrada.

Figura 31 – Linhas das drenagens do reservatório Rio das Pedras.



A interpolação *TIN* seguiu da mesma forma que o *Topo to Raster*, *shape* de pontos

de profundidades e das linhas drenagens, que será denominada “*TIN Stream*”, e outra, apenas com os pontos de profundidade denominada “*TIN Default*”.

Para a análise estatística das discrepâncias entre os pontos interpolados e os pontos da batimetria multifeixe foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson (R) (Equação 4.1), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 4.2), a raiz do erro quadrático médio centrado (CRMSE) (Equação 4.3), o erro médio (BIAS) (Equação 4.4), e *spatial skill score* (SS) (Equação 4.5).

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})(o_i - \bar{o})}{\sigma_m \sigma_o} \quad (4.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2}{N}} \quad (4.2)$$

$$CRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(m_i - \bar{m}) - (o_i - \bar{o})]^2}{N}} \quad (4.3)$$

$$BIAS = \bar{m} - \bar{o} \quad (4.4)$$

$$SS = R^2 - \left(R - \frac{\sigma_m}{\sigma_o} \right)^2 - \left[\frac{(\bar{m} - \bar{o})}{\sigma_o} \right] \quad (4.5)$$

Onde m_i é o ponto do modelo gerado pela interpolação e o o_i é o ponto observado na batimetria multifeixe e N a quantidade total de pontos de profundidade, o σ_m e o σ_o são os desvios padrão dos pontos do modelo interpolado e os pontos observados no multifeixe.

Quando o coeficiente de correlação se aproxima de 1, nota-se um aumento no valor de uma variável quando a outra também aumenta, ou seja, há uma relação linear positiva. Quando o coeficiente se aproxima de -1, também é possível dizer que as variáveis são correlacionadas, mas nesse caso há proporcionalidade inversa. Quando próximo de 0 não há correlação entre as duas variáveis.

Spatial skill score compara os modelos interpolador e observado, com medidas da influência da correlação de padrões espaciais e da média. Valor 1 significa um modelo interpolado perfeito que repete os campos do modelo observado. Valor 0, o modelo não reproduz as características espaciais, mas reproduz bem a média regional (MURPHY; EPSTEIN, 1989).

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS MONOFEIXE E MULTIFEIXE

No reservatório Rio das Pedras obteve-se os dados batimétricos utilizando tanto a técnica monofeixe quanto a técnica multifeixe.

Na técnica monofeixe é comumente utilizado apenas uma antena GPS para dar a localização do barco e um transdutor para medir a profundidade do corpo hídrico. Na técnica multifeixe utiliza-se duas antenas GPS, uma para dar a posição e outra a direção em que a embarcação está navegando, um transdutor, um compensador de ondas que é utilizado para compensar o movimento do barco e um perfilador do som que faz um perfil da velocidade do som na água da linha d'água até o fundo do corpo hídrico.

Para efeito de comparação foram utilizados todos os equipamentos que são utilizados na técnica multifeixe também no monofeixe. Além disso, a aquisição das duas técnicas ocorreu de forma simultânea.

Os dados batimétricos da técnica monofeixe foram processados de duas maneiras, a primeira da forma mais usual, onde utiliza-se apenas uma antena GPS e o transdutor, denominada neste trabalho como “monofeixe clássica”. E a segunda maneira no processamento foi atribuído todos os equipamentos que são utilizados na técnica multifeixe, denominada “monofeixe com periféricos”.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CALCULO DO VOLUME

Para o cálculo do volume, a partir do modelo digital de terreno, utilizou-se como plano de referência (corte em Z) a cota do nível d'água que define o volume morto (Tabela 11). Nível no qual o reservatório não tem mais capacidade para captar água para produção de energia (Figura 32). Foi utilizado como referência o volume morto, pois os dados utilizados compreenderam apenas a área molhada do reservatório, não atingindo dessa forma a cota máxima do volume útil dos reservatórios, nível de referência mais utilizado para o cálculo de volume.

Figura 32 – O volume morto é obtido do nível d'água onde o reservatório perde a capacidade de ser utilizado para o fim do qual foi construído. O volume útil é a parte que compreende a quantidade de água que pode ser utilizada para o fim do qual uma barragem foi construída. O volume maximorum é representado pelo maior nível d'água histórico que o reservatório já atingiu.

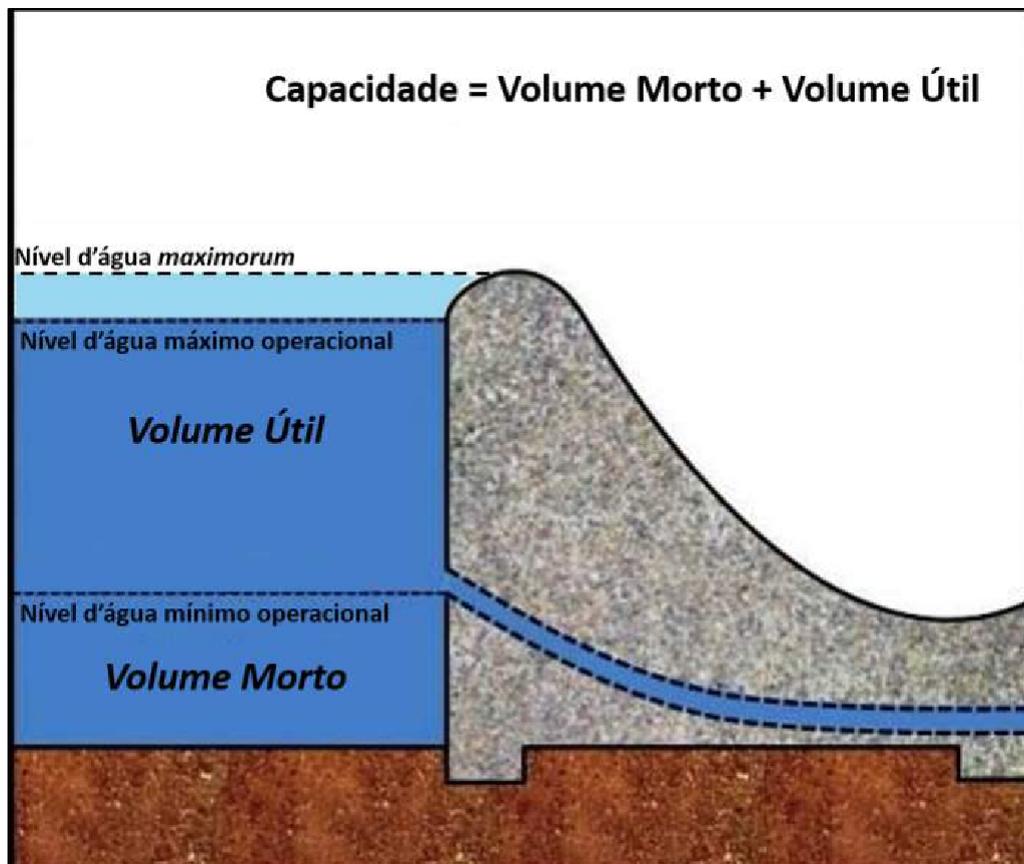


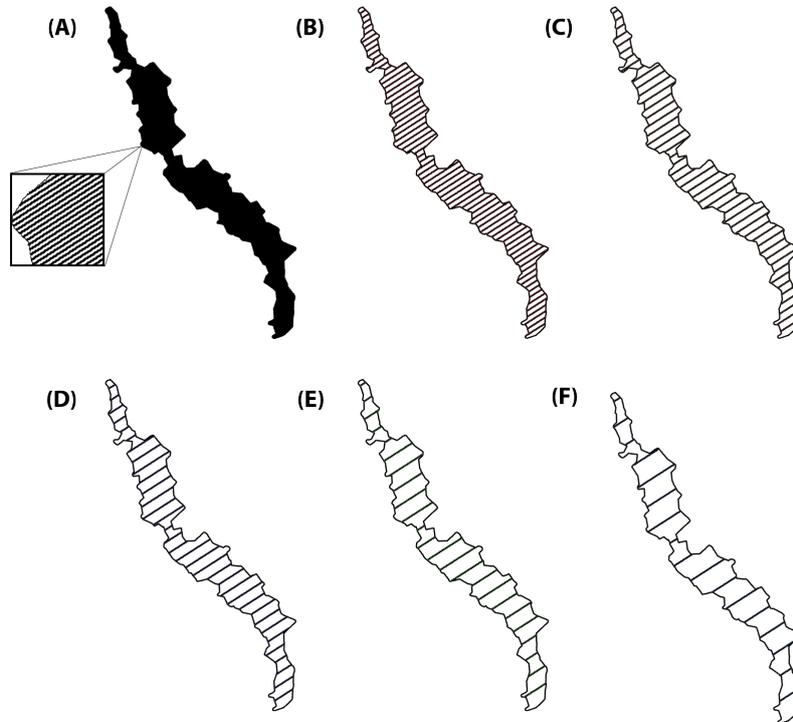
Tabela 11 – Níveis de referência do volume morto utilizados no cálculo de volume dos reservatórios

Reservatório	Cota (m)	Área Superfície (Km^2)	Volume (hm^3)
Rio das Pedras	722,2	0,89	0,91
Água Vermelha	373,3	299,35	4854,08
Irapé	493,5	68,02	3555,13
Capivara	321,0	146,41	3056,78
Chavantes	465,295	127,15	3085,61

O cálculo do volume foi realizado com diferentes distanciamentos entre as seções e diferentes combinações. As seções foram espaçadas em 5m, 10m, 15m, e assim sucessivamente até 210m (Figura 33), com exceção de Rio das Pedras com distanciamento máximo de 365 metros.

O distanciamento de 5 metros possui somente uma configuração e o distanciamento de 210 metros possui 42 diferentes possíveis configurações, totalizando 903 combinações. Na primeira configuração de cada distanciamento a primeira seção utilizada é a mais à jusante do reservatório, ou seja, a primeira seção mais próxima da barragem. Para a segunda configuração as seções são deslocadas 5 metros à montante. Para a terceira configuração as seções são deslocadas 10 metros, e assim por diante. Para o Rio das Pedras, obteve-se 73 diferentes possíveis casos e 2701 combinações no total.

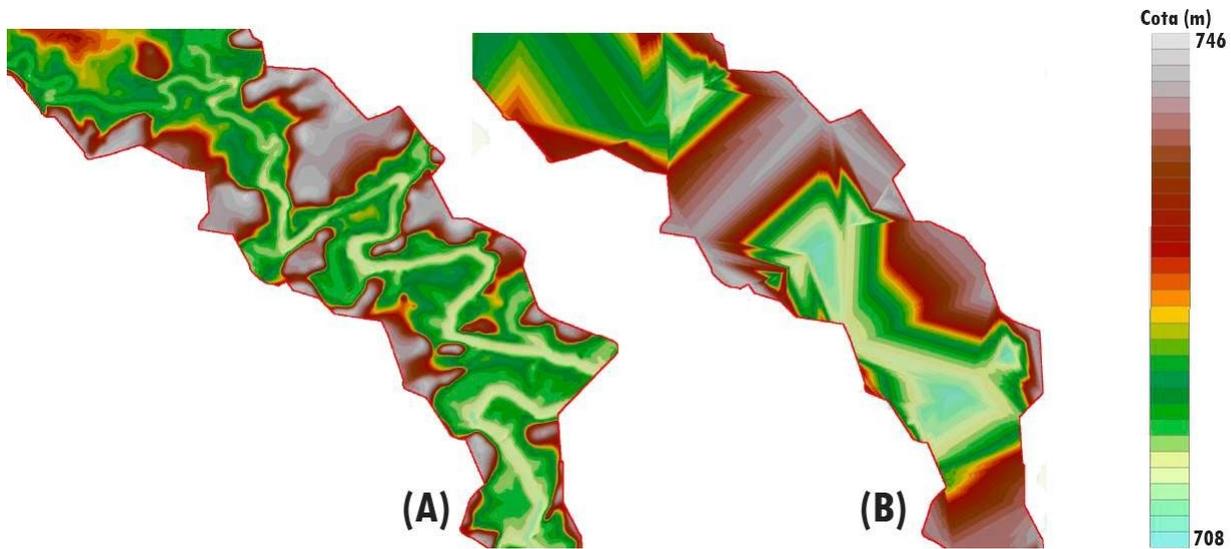
Figura 33 – Exemplo de diferentes espaçamentos entre seções topobatimétricas; (A) 5 metros; (B) 50 metros; (C) 75 metros; (D) 105 metros; (E) 150 metros; (F) 210 metros.



1806 modelos digitais de terreno foram gerados para cada área de estudo, a partir dos interpoladores *TIN* e *Topo to Raster*. Os modelos levaram em conta as diferentes configurações de espaçamento entre as seções topobatimétricas, no intuito de verificar a influência das metodologias de aquisição sobre o resultado final do cálculo do volume de um reservatório.

De modo a exemplificar as diferenças entre os MDTs gerados segundo a metodologia descrita anteriormente, a [Figura 34](#) do reservatório Rio das Pedras apresenta os MDTs com espaçamento de 5 metros e com espaçamento de 365 metros, ambos interpolados pelo método *TIN*. A comparação dos resultados mostra uma grande perda de resolução da morfologia de fundo para o maior espaçamento.

Figura 34 – Modelo digital de terreno gerado por meio do interpolador *TIN*; (A) MDT gerado por seções topobatimétricas espaçadas em 5 metros; (B) MDT gerado por seções topobatimétricas espaçadas em 365 metros



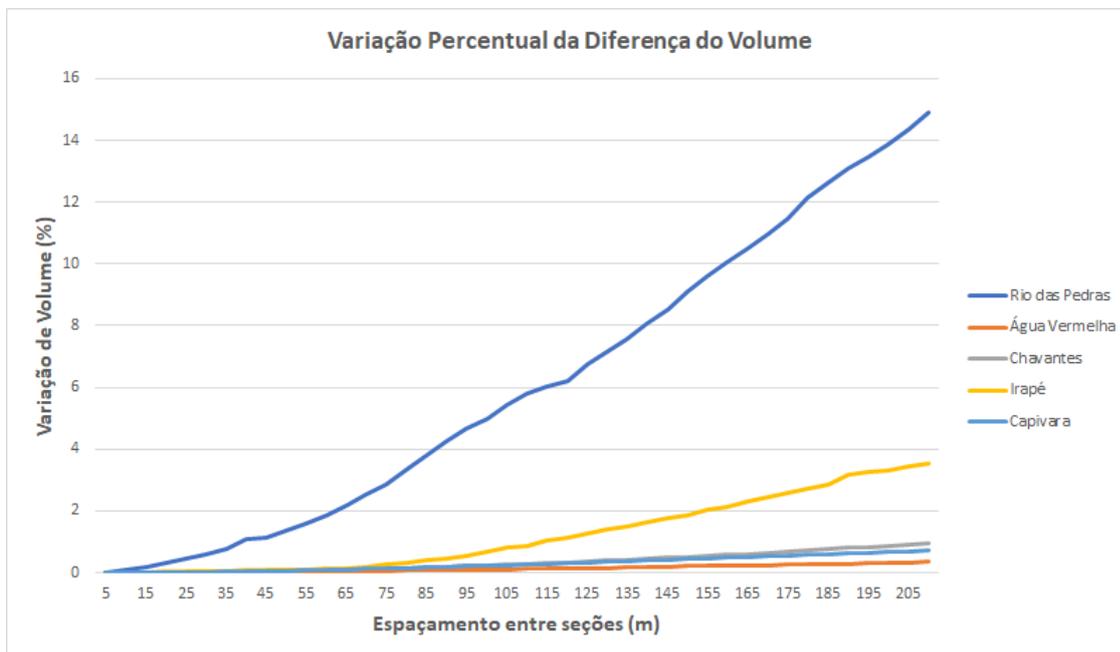
O cálculo de volume foi realizado a partir dos modelos digitais, e foram extraídas as médias dos volumes de cada espaçamento, utilizando suas diferentes configurações. Com isso, verificou-se a diferença entre a média do volume dos diferentes espaçamentos e o volume “real” (resultante da batimetria multifeixe com 100% de recobrimento do reservatório) (Tabela 12).

Tabela 12 – perda de volume para cada espaçamento entre seções topobatimétricas dado em porcentagem

Espaçamento (m)	Diferença no Volume (%)				
	Rio das Pedras	Água Vermelha	Chavantes	Capivara	Irapé
5	0	0	0	0	0
10	0,09	0	0	0	0
15	0,19	0	0,01	0,01	0,02
...
100	4,75	0,10	0,24	0,23	0,69
105	5,44	0,11	0,27	0,25	0,80
110	5,79	0,12	0,29	0,27	0,87
...
200	13,86	0,31	0,87	0,70	3,32
205	14,39	0,32	0,90	0,70	3,43
210	14,90	0,34	0,95	0,74	3,56
...
365	28,11

Como esperado, os menores espaçamentos batimétricos, ou seja, maior resolução, apresentaram as menores diferenças entre os volumes calculados e “real”. Ao passo que o aumento entre as seções de interpolação dos dados, levou ao aumento das diferenças dos volumes e conseqüentemente dos erros na estimativa da capacidade volumétrica dos reservatórios. As maiores diferenças foram observadas nos reservatórios de Rio das Pedras e Irapé, onde obteve-se, para o espaçamento de 210 metros, 14,90% e 3,56% de volume a menos que a referência. Os demais reservatórios tiveram diferenças menores que 1% para os maiores espaçamentos batimétricos ([Figura 35](#)).

Figura 35 – Variação do volume dos diferentes espaçamentos em relação a referência, o multifeixe.



Segundo [Ratkowsky \(1993\)](#), é possível a partir de uma regressão, indicar a força de relação entre duas variáveis, e que, para isso, o tamanho da amostra deve ser suficientemente grande para que se obtenha um resultado estável e confiável. Por isso, para estabelecer a relação entre o espaçamento entre as seções topobatimétricas e o volume calculado nos reservatórios, foi realizado uma regressão dos dados para cada área de estudo.

As equações [Equação 5.1](#), [Equação 5.2](#), [Equação 5.3](#), [Equação 5.4](#) e [Equação 5.5](#) representam a regressão quadrática dos dados do reservatórios Água Vermelha, Capivara, Chavantes, Irapé e Rio das Pedras, respectivamente. As regressões são descritas pelo modelo quadrático, em que X é o espaçamento entre seções dado em metros e Y é o volume médio, em hectômetros cúbicos ([Figura 36](#)).

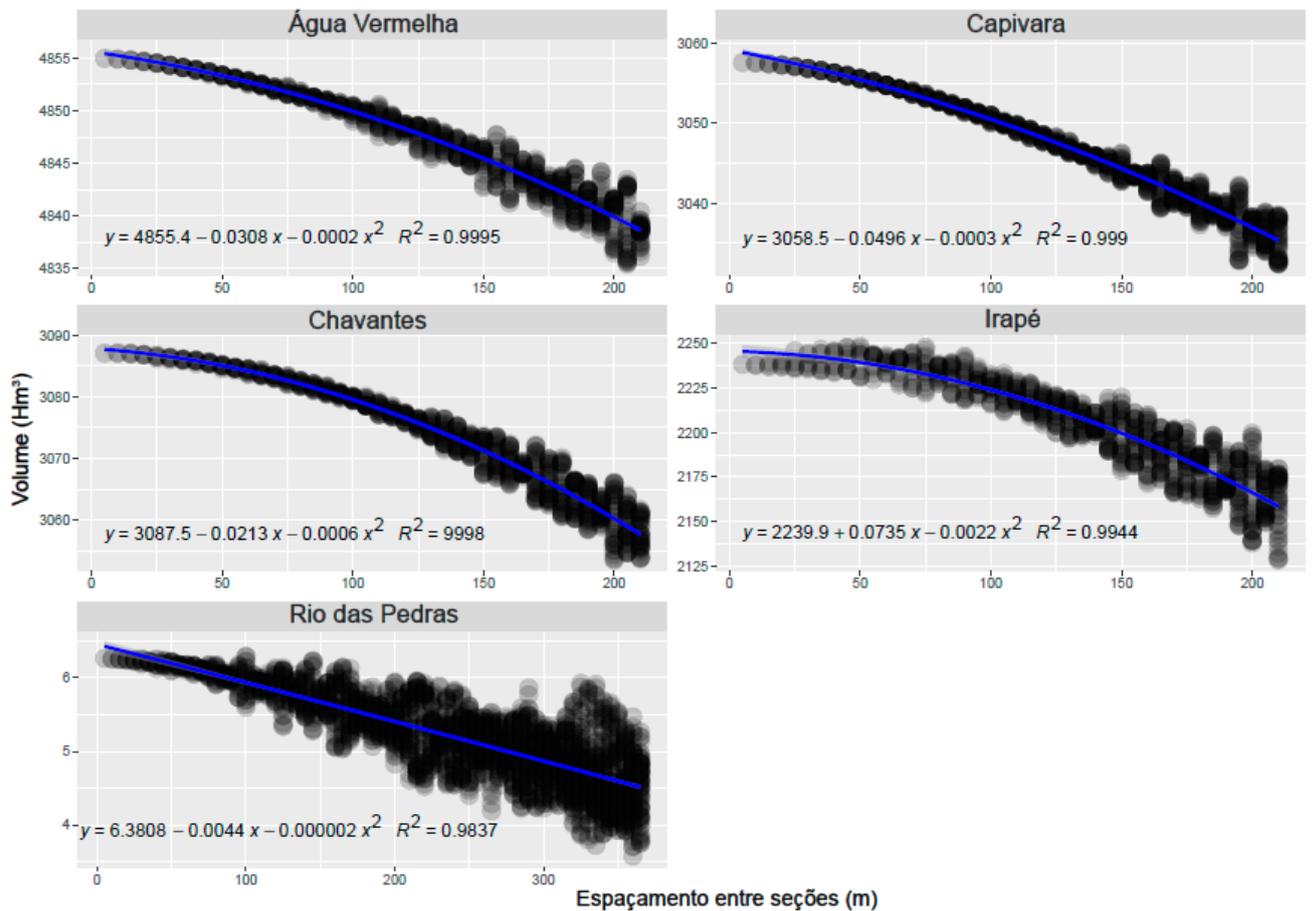
$$Y = 4855,4 - 0,0308X - 0,0002X^2 \quad (5.1)$$

$$Y = 3058,5 - 0,0496X - 0,0003X^2 \quad (5.2)$$

$$Y = 3087,5 - 0,0213X - 0,0006X^2 \quad (5.3)$$

$$Y = 2239,9 - 0,0735X - 0,0022X^2 \quad (5.4)$$

$$Y = 6,3808 - 0,0044X - 0,000002X^2 \quad (5.5)$$

Figura 36 – Gráfico do espaçamento entre seções *versus* volume médio

O valor de R-quadrado (Figura 36) encontrado para as regressões demonstra que as equações encontradas são capazes de prever mais de 99% da variação do volume para um certo espaçamento das seções e vice e versa. A regressão quadrática foi escolhida, pois apresentou valor de R-quadrado, para todos os reservatórios bastante satisfatório, não havendo a necessidade de se procurar uma regressão polinomial de maior grau.

Para todos os ajustes das regressões foi encontrado um valor-p consideravelmente menor que o nível de significância (0,05), indicando que a regressão é estatisticamente significativa, ou seja, que as variáveis são correlacionadas. Portanto, é possível inferir que quanto maior o espaçamento entre as seções topobatimétricas, menor será o volume calculado.

Os gráficos (Figura 36) apresentam variabilidade no volume nas diversas configurações de um mesmo espaçamento. Isso significa, que a determinação do volume depende não só do espaçamento como da posição em que as seções se encontram no reservatório. O Rio das Pedras apresentou uma maior variabilidade no volume para um mesmo espaçamento, seguido de Irapé, Água vermelha, Chavantes e Capivara.

5.2 CARACTERÍSTICAS E MORFOLOGIA DE FUNDO

5.2.1 RESUMO ESTATÍSTICO

Por meio dos dados batimétricos foi possível extrair uma série de informações acerca dos reservatórios. Valores de quantidade de pontos amostrados, profundidade máxima e mínima dos reservatórios, bem como a média, desvio padrão e variância podem ser encontrados na [Tabela 13](#). A estatística envolta nos valores encontrados para a declividade, ou seja, das variações morfológicas do fundo podem ser observadas na [Tabela 14](#).

Tabela 13 – Resumo estatístico dos pontos de profundidade dos reservatórios

	Rio das Pedras	Água Vermelha	Chavantes	Capivara	Irapé
Quantidade de pontos	931969	18680780	7890566	9120434	13523010
Média (m)	6,98308	16,24342	24,45512	20,95773	41,70497
Desvio padrão (m)	2,46397	10,61562	14,40693	10,51476	33,29538
Variância	6,07116	112,9138	207,55957	110,56022	1108,58234
Valor máximo (m)	17,18060	53,10496	76,20662	46,71460	151,13000
Valor mínimo (m)	0	0	0	0	0

Tabela 14 – Resumo estatístico dos pontos de declividade dos reservatórios

	Rio das Pedras	Água Vermelha	Chavantes	Capivara	Irapé
Quantidade de pontos	890614	18647720	7829274	9064282	13303840
Média (°)	6,68872	1,89981	5,43096	3,33163	22,7815
Desvio padrão (°)	7,16821	2,22713	4,94429	3,60266	13,08434
Variância	51,38317	4,96012	24,44596	12,97914	171,20003
Valor máximo (°)	44,04528	22,44827	47,75525	42,26181	87,90459
Valor mínimo (°)	0,00433	0,00024	0,00044	0,00039	0

A análise estatística dos dados identifica as maiores dimensões do reservatório Irapé, apresentando maiores valores de profundidade e de declividade, com no máximo 151 metros e 88°, respectivamente. Enquanto o Rio das Pedras apresenta os menores valores de profundidade, com no máximo 17 metros. Já o Água Vermelha é o que menos apresenta variabilidade em sua profundidade, tendo uma média de 1,9° de declividade ao longo do reservatório.

O resumo estatístico dos reservatórios mostram que cada um possui características próprias, indicando que suas morfologias de fundo não são parecidas.

5.2.2 SINUOSIDADE DO RIO

Os índices de sinuosidade encontrados para os reservatórios podem ser observados na [Tabela 15](#) juntos dos seus parâmetros de extensão e largura. Os reservatórios Rio das Pedras e Chavantes mostraram índices iguais a 1,82 e 1,78, respectivamente, indicando sinuosidade de moderada a alta. O reservatório Irapé, com índice de 1,48, foi classificado com sinuosidade moderada, enquanto os reservatórios Capivara e Água vermelha possuem baixa e muito baixa sinuosidades, respectivamente ([Figura 37](#)).

Figura 37 – Sinuosidade do canal alagado dos reservatórios representado pela cor azul escura (A) Reservatório Capivara (B) Reservatório Água Vermelha (C) Reservatório Rio das Pedra (D) Reservatório Irapé

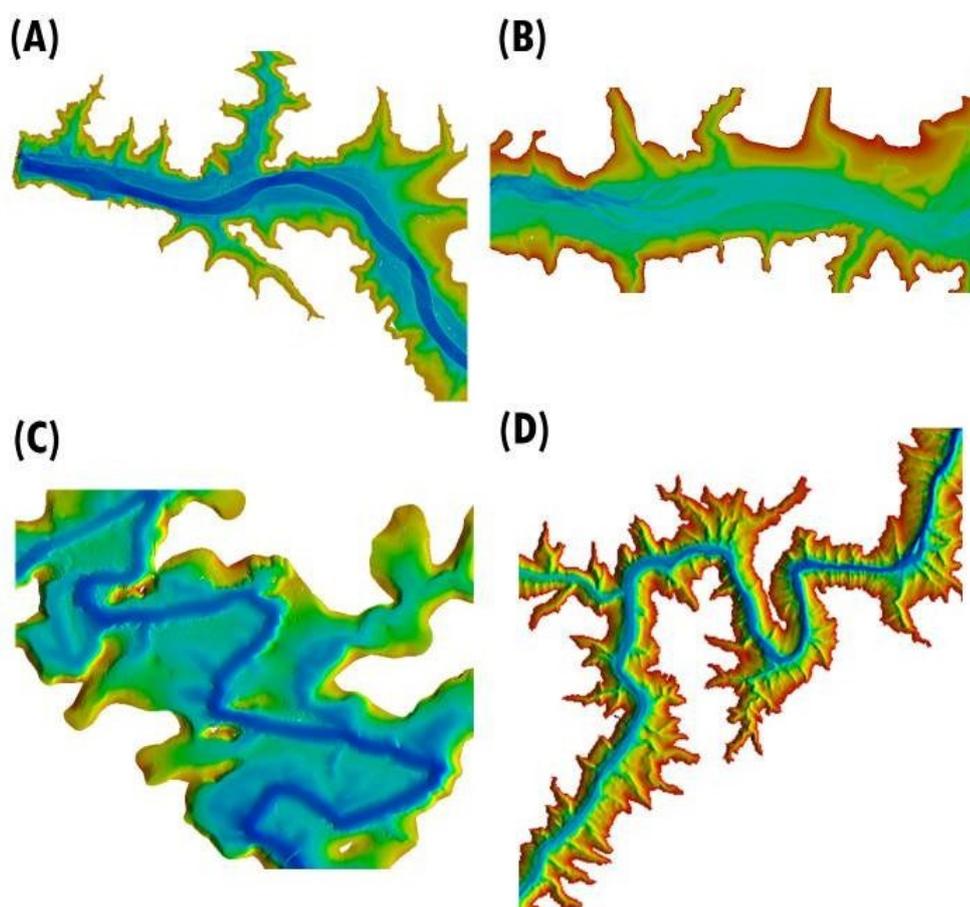
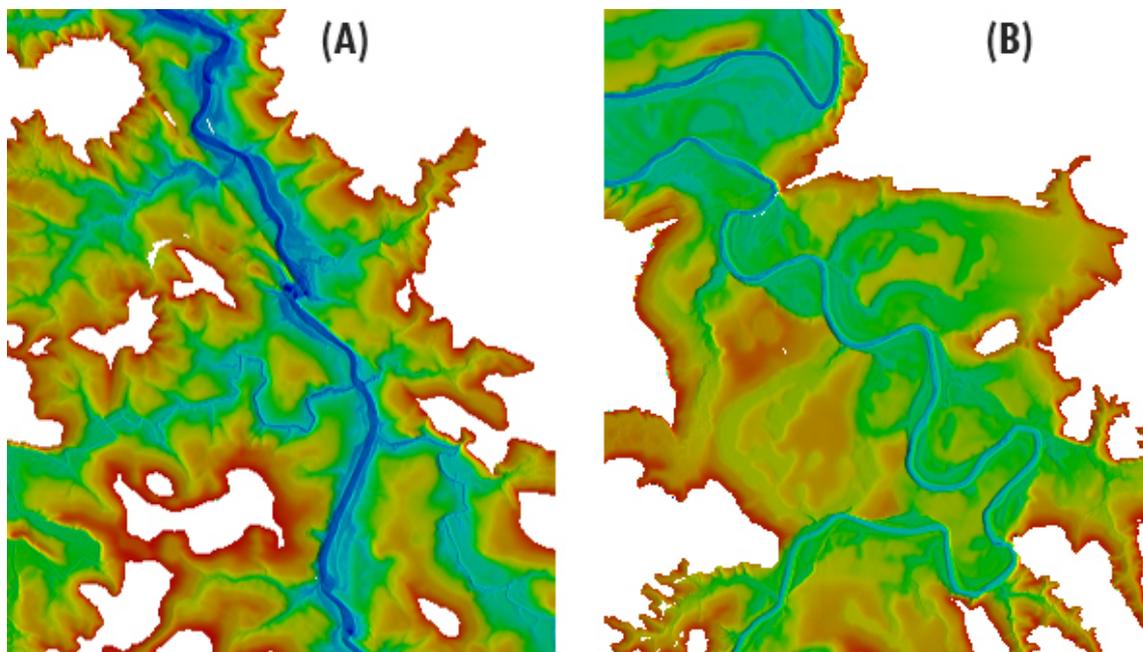


Tabela 15 – Características do canal submerso dos reservatórios, como sinuosidade, comprimento e largura

	Índice de Sinuosidade	Sinuosidade do Canal	Extensão Total (Km)	Largura Média (m)
Rio das Pedras	1,82	moderada-alta	7,21	12,69
Água Vermelha	1,07	muito baixa	114,97	658,17
Chavantes	1,78	moderada-alta	73,01	103,04
Capivara	1,19	baixa	81,74	186,15
Irapé	1,48	moderada	94,04	93,28

No reservatório Chavantes, os canais internos mostram uma transição de um rio meandrante para um rio mais retilíneo, dessa forma, dividiu-se o rio onde, na porção à montante foi encontrado um índice de 2,41, caracterizado por um rio com alta sinuosidade, e na porção à jusante onde foi obtido o índice de 1,24, de baixa sinuosidade. O talvegue do rio, ponto de maior profundidade (em azul) (Figura 38), do reservatório Chavantes mostra em detalhes o rio alagado e a transição da parte não sinuosa à jusante para uma parte de alta sinuosidade na porção à montante.

Figura 38 – Canal do rio Paranapanema no reservatório Chavantes; (A) Porção jusante do reservatório; (B) Porção montante do reservatório



Uma sinuosidade alta caracteriza-se por um rio cheio de curvas ou meandrante, já uma baixa sinuosidade define um rio mais reto ou retilíneo. Observa-se que quanto mais sinuoso o canal submerso de um reservatório é, maior é o gradiente da profundidade entre as seções topobatimétricas.

5.2.3 ÍNDICES DE COMPLEXIDADE DE TERRENO

Os reservatórios também foram classificados quanto a sua complexidade de terreno. Os resultados obtidos para os índices compostos de complexidade do terreno foram obtidos com o software ArcGis.

Os valores de média, mínimo, máximo e do desvio padrão para os quatro índices de complexidade de terreno sugeridos por Huaxing (2008), bem como os valores de CTCI de todos os reservatórios podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores dos índices de complexidade de terreno dos reservatórios

Rio das Pedras				
Índices	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Rugosidade	0,1924	0,6499	0,0036	0,1556
Diferença de Altura Local	0,3065	2,6112	0	0,3436
Curvatura Total	1,6148	76,4438	0	2,6616
Desvio Padrão da Declividade	0,0986	0,7887	0	0,1095
CTCI	0,2653	1	0	0,1875

Água Vermelha				
Índices	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Rugosidade	0,3426	4,1256	0,0037	0,3984
Diferença de Altura Local	0,3398	4,6289	0	0,3908
Curvatura Total	0,2979	24,6307	0	0,3931
Desvio Padrão da Declividade	0,1105	1,3485	0	0,1276
CTCI	0,0691	1	0	0,3275

Chavantes				
Índices	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Rugosidade	0,9929	10,9123	0,0065	0,9205
Diferença de Altura Local	0,9885	10,9123	0	0,9192
Curvatura Total	0,6748	45,6356	0	0,9754
Desvio Padrão da Declividade	0,3174	3,5690	0	0,2924
CTCI	0,0864	1	0	0,7768

Irapé				
Índices	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Rugosidade	2,6036	78,8500	0,0041	2,6974
Diferença de Altura Local	2,4846	123,4800	0	2,5906
Curvatura Total	13,2902	5442,2768	0	39,6804
Desvio Padrão da Declividade	0,7940	47,0718	0	0,8356
CTCI	0,1481	1	0	

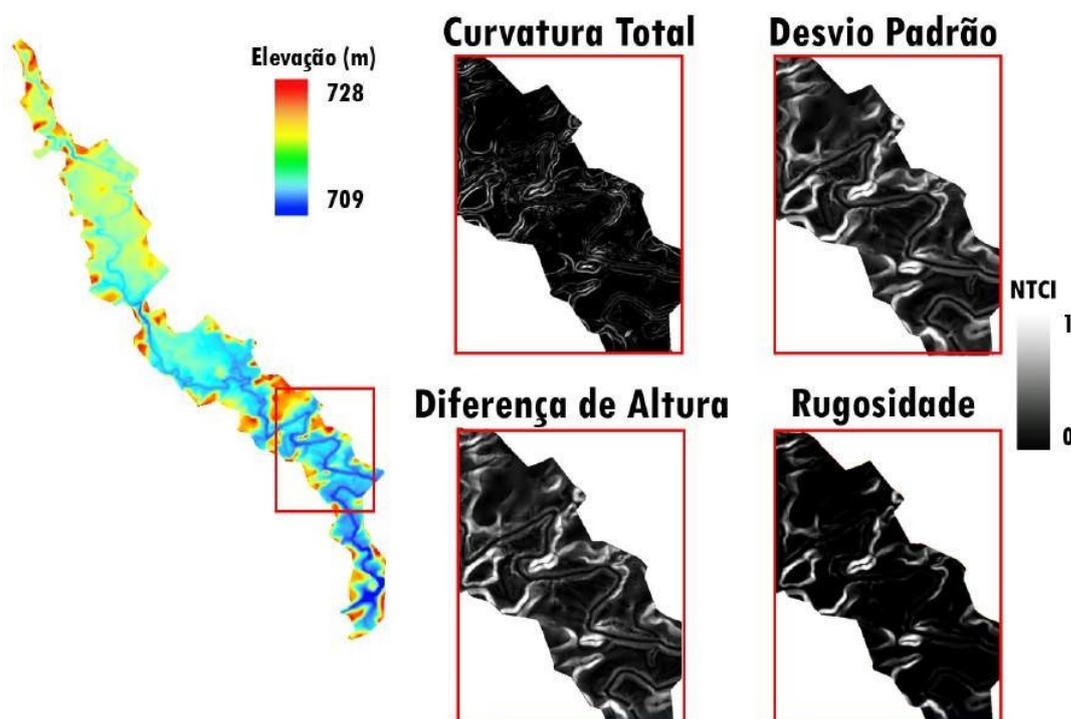
Capivara				
Índices	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão

Rugosidade	0,6055	4,5	0,0043	0,6292
Diferença de Altura Local	0,6099	8,5851	0	0,6503
Curvatura Total	0,6083	55,7229	0	0,7991
Desvio Padrão da Declividade	0,1963	2,9667	0	0,2091
CTCI	0,0744	1	0	

A complexidade do terreno classificou os reservatórios Rio das Pedras e Irapé como de baixa complexidade de fundo, valores de 0,2653 e 0,1481, respectivamente. Enquanto, os reservatórios de Chavantes, Água Vermelha e Capivara foram classificados como de muito baixa complexidade de fundo, com valores de 0,0864, 0,0691 e 0,0744.

Para o reservatório de Rio das Pedras, os índices normalizados de complexidade podem ser observados na [Figura 39](#), onde as cores mais escuras representam pouca ou nenhuma complexidade, enquanto cores claras indicam alta complexidade de terreno. Os maiores valores dos índices de complexidade estão localizados em regiões com alta declividade ou alta variabilidade da profundidade. Já os menores valores podem ser observados em regiões que sejam planas ou com baixíssima variabilidade da profundidade.

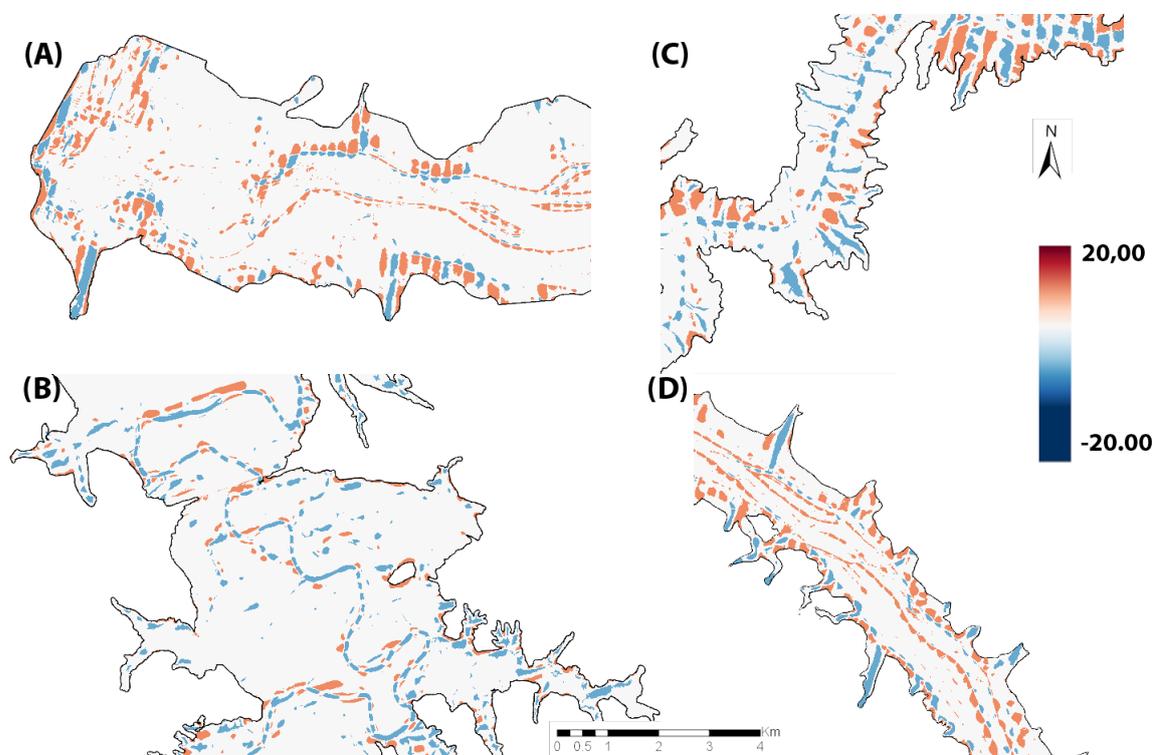
Figura 39 – Modelos digitais de terrenos amplificados caracterizando os índices de complexidade de rugosidade, curvatura total, diferença de altura local e desvio padrão da declividade



5.2.4 OPERAÇÕES EM MODELOS DIGITAIS DE TERRENO

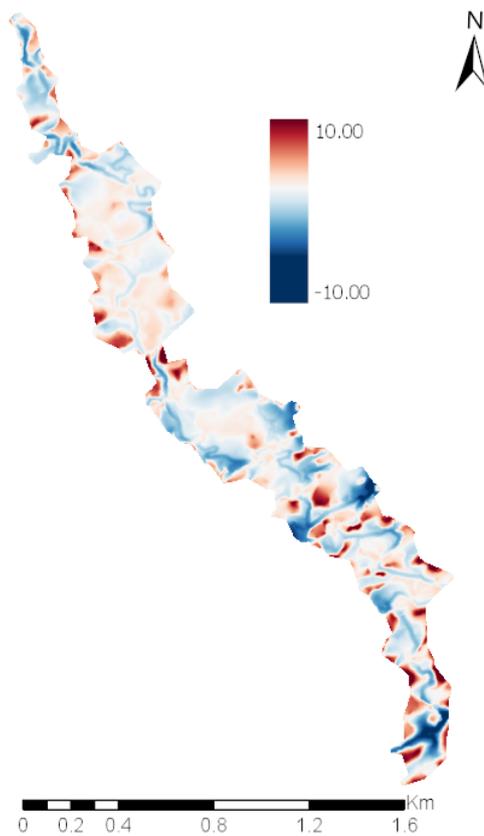
A partir do *software ArcGis* e da ferramenta *Raster Calculator*, foram obtidas as diferenças entre os diferentes modelos de terreno fruto das diversas seções batimétricas interpoladas e do modelo obtido pela batimetria multifeixe com 100% de recobrimento do reservatório. A subtração entre os MDTs das seções batimétricas pelo o MDT multifeixe (Figura 40) permitiu observar que os valores encontrados se aproximam de zero ao longo de toda a região sondada, com exceção do reservatório Rio das Pedras. Esse resultado mostra que a interpolação foi capaz de representar o fundo de maneira satisfatória, até mesmo para as seções com maiores espaçamentos. Isso porque a resposta esperada para a subtração dos rasters é de uma superfície plana, no caso dos modelos que tenham obtido boa representação das morfologias de fundo interpoladas. No entanto, o Rio das Pedras, mesmo após a subtração dos rasters, ainda mantém características do canal submerso, indicando que a interpolação de 365 metros não foi eficiente na representação correta de sua superfície (Figura 41).

Figura 40 – Mapa de calor dos reservatórios (A) Água Vermelha, (B) Chavantes, (C) Irapé e (D) Capivara, resultante da subtração entre o MDT da batimetria multifeixe e o MDT de 210 metros. Cores quentes indicam valores positivos, cores frias indicam valores negativos e a cor branca indica valores próximos de zero.



O histograma da diferença entre o MDT multifeixe e MDT com espaçamento de 365 metros no Rio das Pedras, espaçamento máximo permitido pela Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 3, é observado na Figura 42. A média da diferença entre os dois MDTs é

Figura 41 – Mapa de calor do reservatório Rio das Pedras resultante da subtração entre o MDT da batimetria multifixe e o MDT de 365 metros. Cores quentes indicam valores positivos, cores frias indicam valores negativos e a cor branca indica valores próximos de zero.

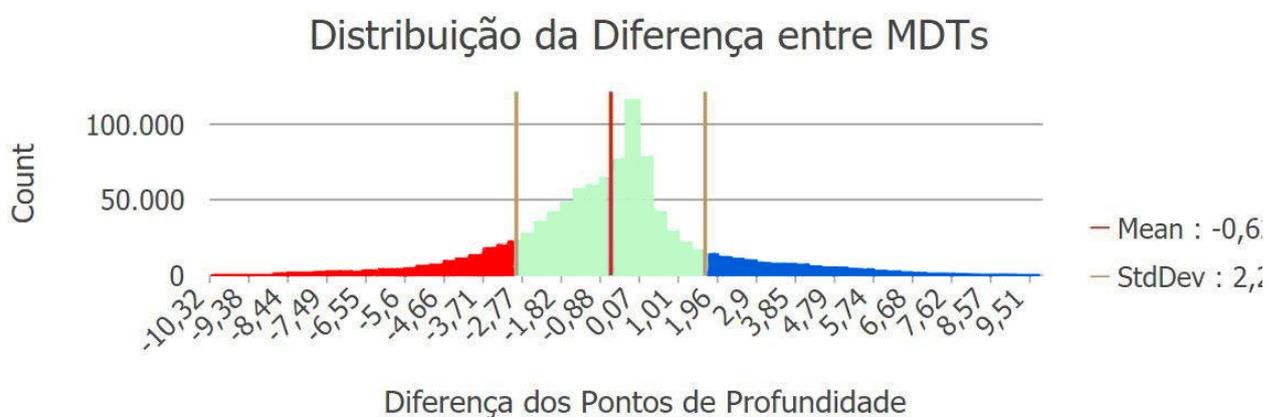


de 0,62 metro e o desvio padrão é de $\pm 2,28$ metros. A diferença dos MDTs indicou valores positivos como os pontos de maior profundidade deixados pela interpolação, enquanto valores negativos indicaram menores profundidades produzidas pela interpolação. O valor zero indicou pouca ou nenhuma diferença entre o modelo com o multifixe e o modelo com as seções batimétricas interpoladas.

A partir do histograma das diferenças dos pontos de profundidade e da análise de distribuição dos dados, dividiu-se o *raster* do multifixe em três partes: a primeira compreende os valores dentro dos extremos do desvio padrão (em verde), a segunda compreende os valores positivos acima do desvio padrão (em azul) e a terceira compreende os valores negativos abaixo do desvio padrão (em vermelho) (Figura 43).

Observa-se que os valores negativos coincidem com o canal submerso do reservatório, ou seja, com as partes mais profundas do reservatório, enquanto as áreas com valores positivos representam as partes mais rasas do reservatório. Tanto o interpolador *TIN*, quanto o *TopoToRaster*, apresentaram uma resposta suavizada para as profundidades, deixando as regiões mais profundas com menores valores e as regiões muito rasas com

Figura 42 – Distribuição da diferença dos pontos de profundidade entre um *raster* do MDT multifeixe e do MDT de 365 metros para o reservatório Rio das Pedras



valores mais profundos. Portanto, quando há um aumento no espaçamento entre as seções, os interpoladores suavizam os pontos de profundidade adjacentes.

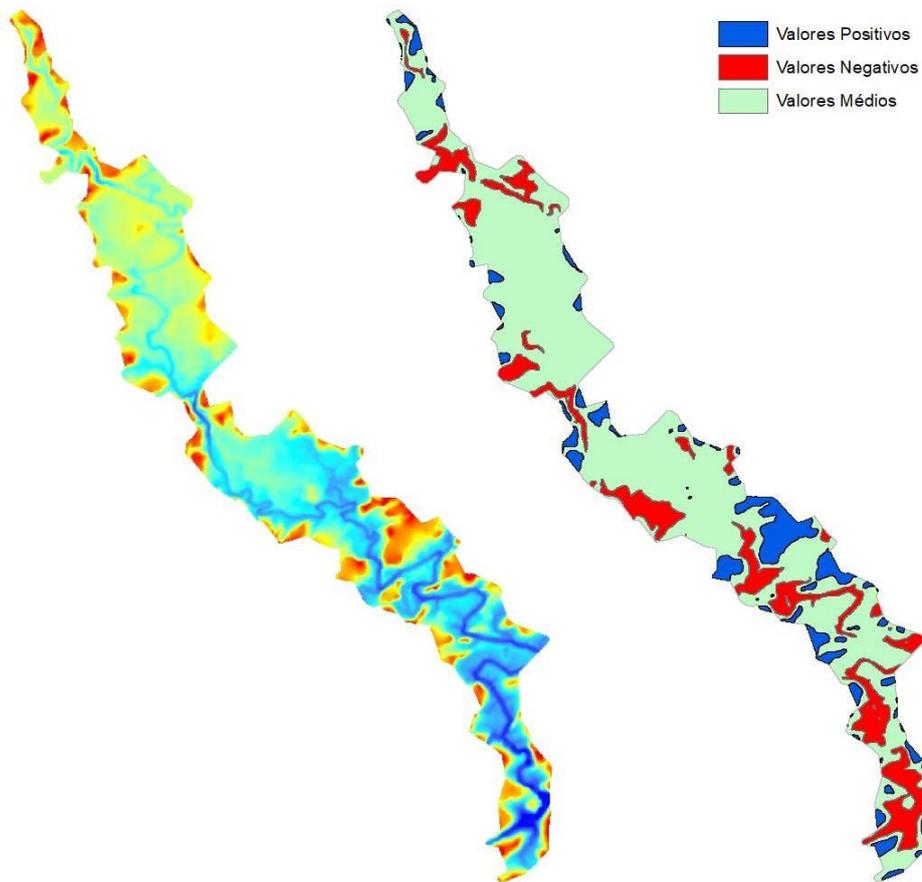
Os resultados do reservatório Rio das Pedras de área, volume e diferença de cada parte dos domínios separados segundo o histograma para o MDT multifeixe e o MDT com o maior espaçamento 365 (metros) podem ser observados na Tabela 17. Os valores positivos representam 8,38% do reservatório, enquanto os valores negativos 20,94% e os valores médios 70,68%. A interpolação resultou em um aumento de 418% do volume no domínio dos valores positivos, diminuição de 55% no domínio dos valores negativos e de 7% no domínio dos valores médios. Apesar do aumento do volume na região dos valores positivos, ele representa apenas 8% do reservatório enquanto a região que teve 55% de redução no volume representa mais que 20%. Dessa forma, como o canal do rio (onde há a maior perda de volume na interpolação) representa grande parte do Rio das Pedras, o volume perdido com o aumento do espaçamento é consideravelmente maior que a situação com os demais reservatórios.

Tabela 17 – Volumes do MDT Multifeixe e MDT 365 metros do reservatório Rio das Pedras

Área (Km ²)	MDT Multifeixe		MDT 365 metros	
	Volume (Hm ³)	Volume (Hm ³)	Diferença (%)	
Valores Positivos	0,076	0,145	0,608	418,68
Valores Negativos	0,189	1,550	0,859	180,35
Valores Médios	0,637	4,200	3,896	107,79

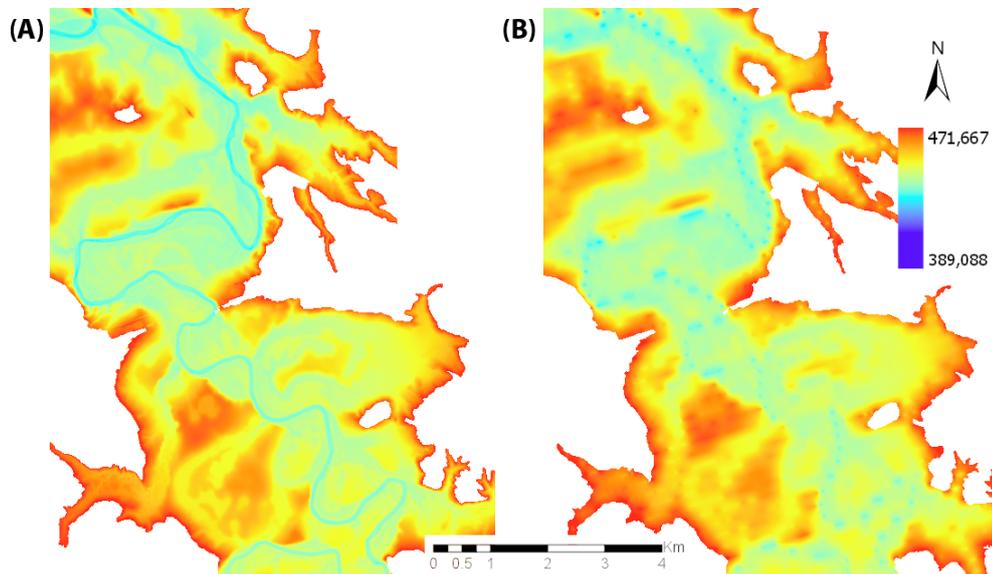
Entende-se, então, que a perda do volume é mais acentuada no Rio das Pedras devido a descontinuidade da interpolação causada por um canal sinuoso que ocupa a maior área do reservatório em questão. O reservatório Chavantes, apesar de ter uma

Figura 43 – Distribuição da diferença dos pontos de profundidade entre um *raster* do MDT multifeixe e do MDT de 365 metros do reservatório Rio das Pedras



alta sinuosidade, possui um canal muito estreito se comparado ao total do reservatório, dessa forma, o canal não é bem representado com a interpolação (Figura 44), que por seu tamanho estreito não interfere no posterior cálculo de volume com seções mais espaçadas e menores densidades de pontos amostrados. Os resultados mostraram que os interpoladores têm dificuldade em representar de forma correta regiões que possuem alta complexidade de fundo ou descontinuidades entre seções topobatimétricas.

Figura 44 – Reservatório Capivara; (A) MDT Multifeixe - O canal sinuoso está destacado pela cor azul clara; (B) MDT 210 metros - Não é possível determinar o canal submerso.



5.3 COMPARAÇÃO ENTRE INTERPOLADORES

Cada interpolador possui características que lhe dão vantagens e desvantagens na interpolação dos dados. Como exposto na revisão bibliográfica, autores de diversos artigos classificam o interpolador *TIN* com melhores resultados para reservatórios. Os resultados apresentados nesse item, pretende analisar de forma estatística as diferenças entre os interpoladores *TIN* e *Topo to Raster*.

Os resultados encontrados para o RMSE (Tabela 18) das discrepâncias entre o modelo interpolado e o modelo observado (multifeixe) são menores para o *Topo to Raster*, porém não há muita diferença em relação ao interpolador *TIN*. Isso indica que, estatisticamente, o *Topo to Raster*, apesar de ser pequena a diferença, apresentou um erro menor na interpolação comparado ao *TIN*. Os valores de RMSE são ainda menores quando além dos pontos de profundidade, utiliza-se as linhas de drenagem (*Stream*) na interpolação.

O coeficiente de correlação e a diferença do RMS fornecem informações estatísticas complementares que quantificam a correspondência entre dois padrões, mas para uma caracterização mais completa, os desvios padrão dos modelos também devem ser dados. As estatísticas de CRMSE, RMSE e desvio padrão são úteis em comparações de padrões, e é possível exibir todas elas em um único diagrama facilmente interpretável. A Figura 45 mostra o Diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001), por meio dele, é possível observar quão próximo os modelos interpolados correspondem às observações (multifeixe).

Além do RMSE, foi calculado o volume para cada interpolador e os espaçamentos

Tabela 18 – Valores de coeficiente de correlação (R), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), a raiz do erro quadrático médio centrado (CRMSE), o erro médio (BIAS), o *spatial skill score* (SS) e desvio padrão para cada interpolador e seus espaçamentos

	R	RMSE	CRMSE	BIAS	SS	Desv. P.
<i>MBES</i>	1	0	0	0	1	2,895
<i>Topo to Raster Default 5m</i>	0,9993	0,1086	0,1085	-0,0045	0,9986	2,8698
<i>Topo to Raster Stream 5m</i>	0,9994	0,1081	0,1085	-0,0054	0,9986	2,9033
<i>TIN Default 5m</i>	0,9992	0,1153	0,1153	-0,0015	0,9984	2,8834
<i>TIN Stream 5m</i>	0,9989	0,1362	0,1362	-0,0021	0,9978	2,8939
<i>Topo to Raster Default 100m</i>	0,7434	1,9389	1,9382	0,0506	0,5514	2,0613
<i>Topo to Raster Stream 100m</i>	0,7887	1,7973	1,7812	-0,2397	0,6145	2,2103
<i>TIN Default 100m</i>	0,7497	1,9214	1,9093	0,2150	0,5564	2,1849
<i>TIN Stream 100m</i>	0,7677	1,8521	1,8487	0,1113	0,5879	2,2111
<i>Topo to Raster Default 210m</i>	0,6126	2,3992	2,3177	0,6201	0,3130	2,1439
<i>Topo to Raster Stream 210m</i>	0,6765	2,1904	2,1694	0,3026	0,4274	2,3597
<i>TIN Default 210m</i>	0,5253	2,8385	2,5955	1,1492	0,0321	2,3582
<i>TIN Stream 210m</i>	0,5767	2,5727	2,4463	0,7967	0,2049	2,3187

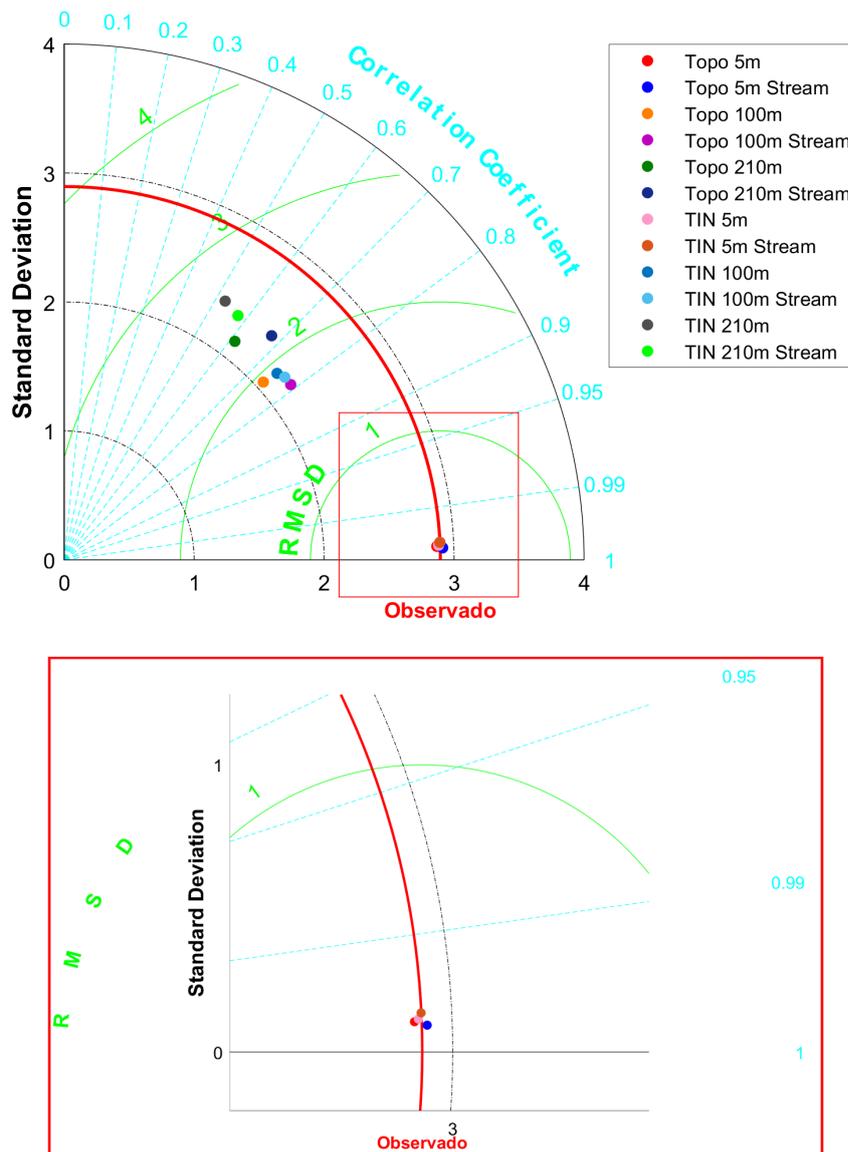
de 5m, 100m e 210m. A perda de volume nos dados interpolados seguiu a mesma tendência dos valores de RMSE. Onde os menores valores de RMSE coincidiram com as menores perda de volume da interpolação com relação ao multifeixe. A maior perda de volume foi obtida para o interpolador *TIN Default*, enquanto a menor perda foi no *Topo to Raster Stream*. Para ambos interpoladores uma melhora considerável foi observada no cálculo do volume quando adicionado as linhas de drenagem, com exceção do cálculo com espaçamento de 5 metros, onde houve um pequeno aumento no volume calculado com relação ao volume do multifeixe.

Tabela 19 – Perda de volume na interpolação em relação ao multifeixe

	5 metros	100 metros	210 metros
<i>Topo to Raster Default</i>	0%	-1,05%	-9,72%
<i>Topo to Raster Stream</i>	+0,43%	-0,01%	-4,87%
<i>TIN Default</i>	0%	-2,75%	-16,38%
<i>TIN Stream</i>	+0,64%	-2,00%	-12,50%

Os demais índices apresentaram concordância com o RMSE, com exceção do BIAS. Os valores de coeficiente de correlação e *spatial skill score* (SS) foram maiores para as interpolações quando utilizado o *shape* de drenagens. Já, a subtração da média dos modelos interpolados pelo modelo observado (BIAS) teve uma diferença maior nos dados de 5 e

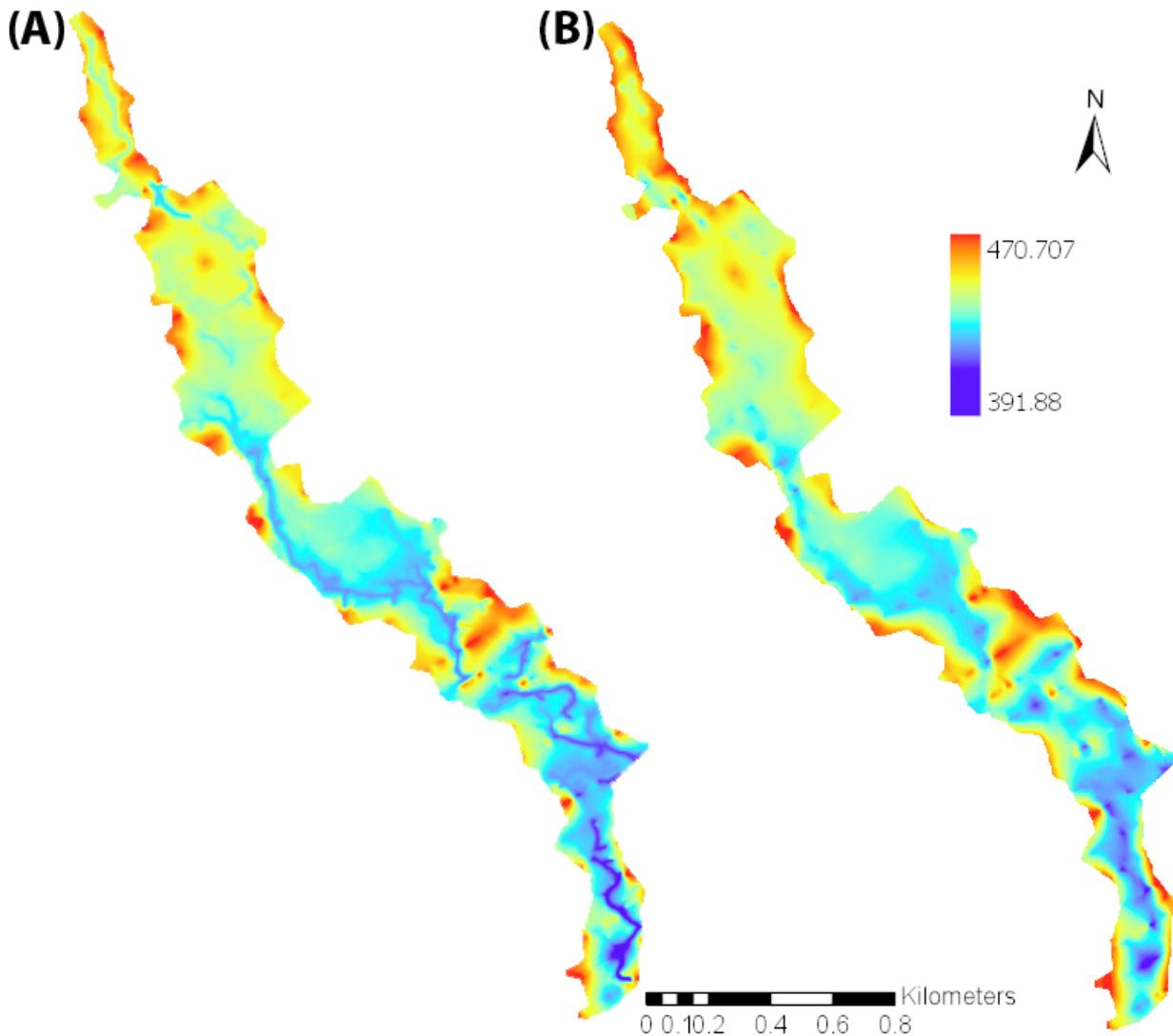
Figura 45 – O Diagrama de Taylor resume graficamente quão próximo um conjunto de dados corresponde às observações. A similaridade entre dois padrões é quantificada em termos de sua correlação, sua diferença da raiz do valor quadrático médio centrado e amplitude de suas variações (representadas por seus desvios padrão). Os círculos coloridos representam os modelos interpolados e quanto mais próximos estão do observado, melhor representam os dados observados no multifeixe.



100 metros.

A Figura 46 apresenta um *raster* com o interpolador *TIN* e um *raster* com o interpolador *Topo to Raster*, ambos com espaçamento entre seções de 100 metros e com as linhas de drenagem. Observa-se uma melhor representação do fundo do corpo hídrico pelo interpolador *Topo to Raster* em relação ao *TIN*, principalmente em relação a representação do canal submerso.

Figura 46 – (A) Interpolador *Topo to Raster Stream 100m*; (B) Interpolador *TIN Stream 100m*;

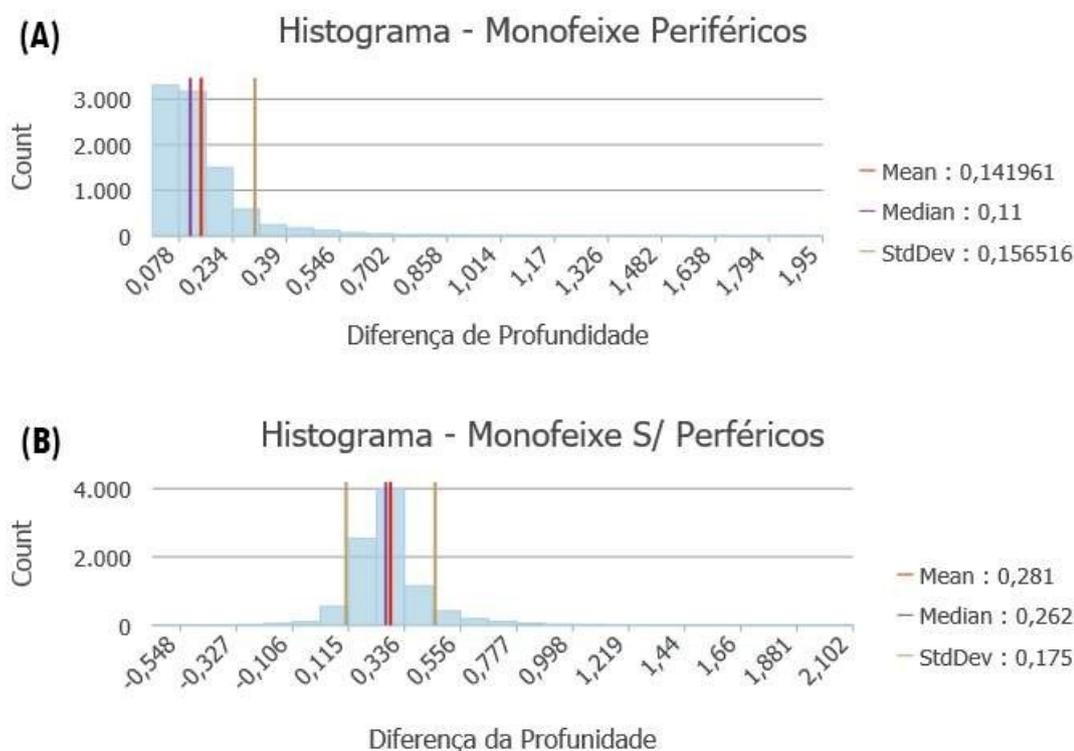


5.4 COMPARAÇÃO ENTRE BATIMETRIA MULTIFEIXE E MONOFEIXE

Com o intuito de entender as diferenças entre as técnicas batimétricas monofeixe e multifeixe, realizou-se a subtração de 54 perfis onde o monofeixe sobrepõe ao multifeixe no reservatório Rio das Pedras. O processamento dos dados coletados por meio do monofeixe utilizando os mesmos equipamentos que o multifeixe, mostrou que o monofeixe apresenta apenas profundidades iguais ou menores que os dados coletados por meio do multifeixe. Já para os dados processados apenas utilizando o GPS e o transdutor do monofeixe, como é feito usualmente por essa técnica de aquisição, foram observadas diferenças entre os

pontos com acréscimos e diminuições nos valores encontrados.

Figura 47 – Histograma das diferenças das profundidades entre multifeixe e monofeixe



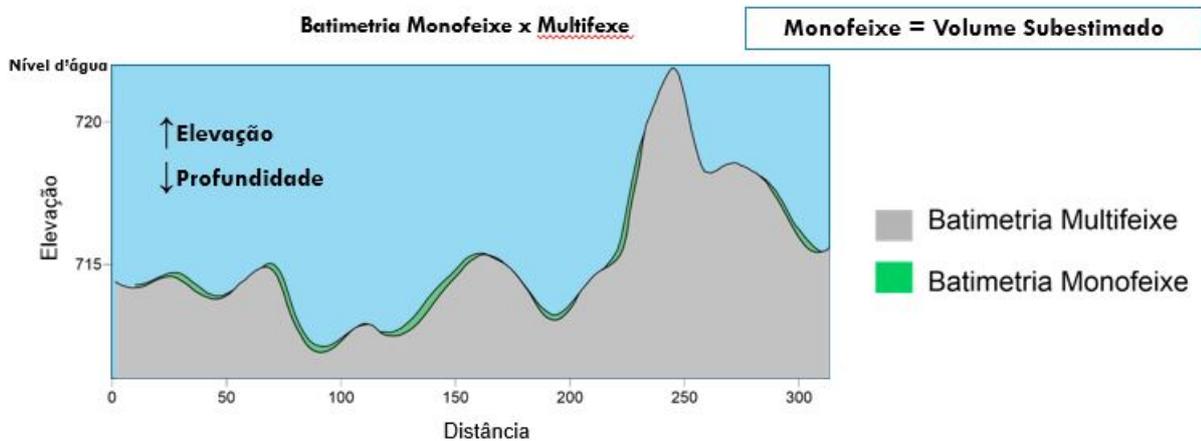
Observa-se nos perfis da [Figura 48](#) que a profundidade medida no monofeixe é, em geral, menor do que a medida no multifeixe. A técnica monofeixe clássica apresentou uma diferença média de 0,28 metro enquanto o monofeixe utilizando os mesmos equipamentos do multifeixe, apresentou uma média de 0,14 metro. A diferença para todos os perfis pode ser analisada na [Tabela 20](#) e nos histogramas da [Figura 47](#).

Tabela 20 – Resumo estatístico da diferença entre as técnicas multifeixe e monofeixe

	Monofeixe c/ Periféricos	Monofeixe Clássico
Quantidade de pontos	9344	9344
Média (m)	0,1422	0,2809
Desvio padrão (m)	0,1584	0,1769
Variância	0,025	0,0313
Valor máximo (m)	2,51	2,662
Valor mínimo (m)	0	-0,658

Observando o *raster* [Figura 49](#) da batimetria multifeixe e monofeixe, é possível definir uma maior resolução do MDT gerado a partir do multifeixe, uma vez que no modelo monofeixe não é possível identificar o canal do rio represado. A partir do cálculo do volume para os dois MDTs, nota-se que a técnica monofeixe clássica apresentou um volume 1,9%

Figura 48 – Perfil da profundidade das técnicas multifeixe e monofeixe



menor (Tabela 21) que o volume encontrado pela técnica multifeixe e a técnica monofeixe com os mesmos equipamentos do multifeixe apresentou um volume 1% menor para um espaçamento das seções de 60 metros.

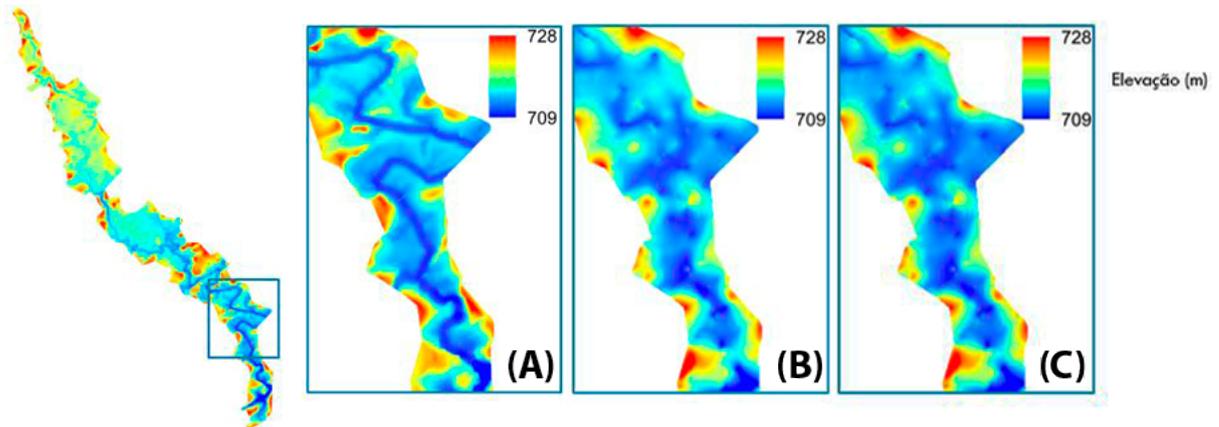
Tabela 21 – Diferença dos Volumes entre as técnicas de aquisição para seções espaçadas em 60 metros.

Técnica	Cota (m)	Volume (hm ³)	Diferença (%)
Multifeixe	723,63	6,26	0
Monofeixe Clássico	723,63	6,15	1,9
Monofeixe c/ Periféricos	723,63	6,2	1

Na técnica monofeixe clássica foi encontrado, por meio da técnica *BarCheck*, um valor médio de 1499,17 m/s para a velocidade do som na coluna d'água no momento da aquisição dos dados. Enquanto a medida da velocidade do som por meio de uma sonda (Figura 50) teve média de 1496,55 m/s, sendo 1499,46 m/s na lamina d'água e 1494,04 m/s no fundo do corpo hídrico. Isso mostra que a não utilização de um perfil da velocidade do som da coluna d'água resultou em uma diferença de, aproximadamente, 4 cm nos dados adquiridos pela técnica clássica.

Portanto, se levarmos em conta a inclinação média de 6,7° do reservatório Rio das Pedras (Tabela 14) e o ecobatímetro monofeixe com *beamwidth* de 8° (subseção 4.1.1) e profundidade ao nadir de 17 m, a resposta obtida será igual a 16,86 m, ou seja, uma incerteza de aproximadamente 0,14 m. A incerteza aumenta ao passo que a profundidade e a declividade aumentam. Para o reservatório Irapé, por exemplo, a incerteza pode chegar a 4,89 m para uma profundidade de 150 m e inclinação de 25°. Nota-se que o ecobatímetro registra o relevo mais suave do que o real. Quanto maior for a largura do feixe, mais

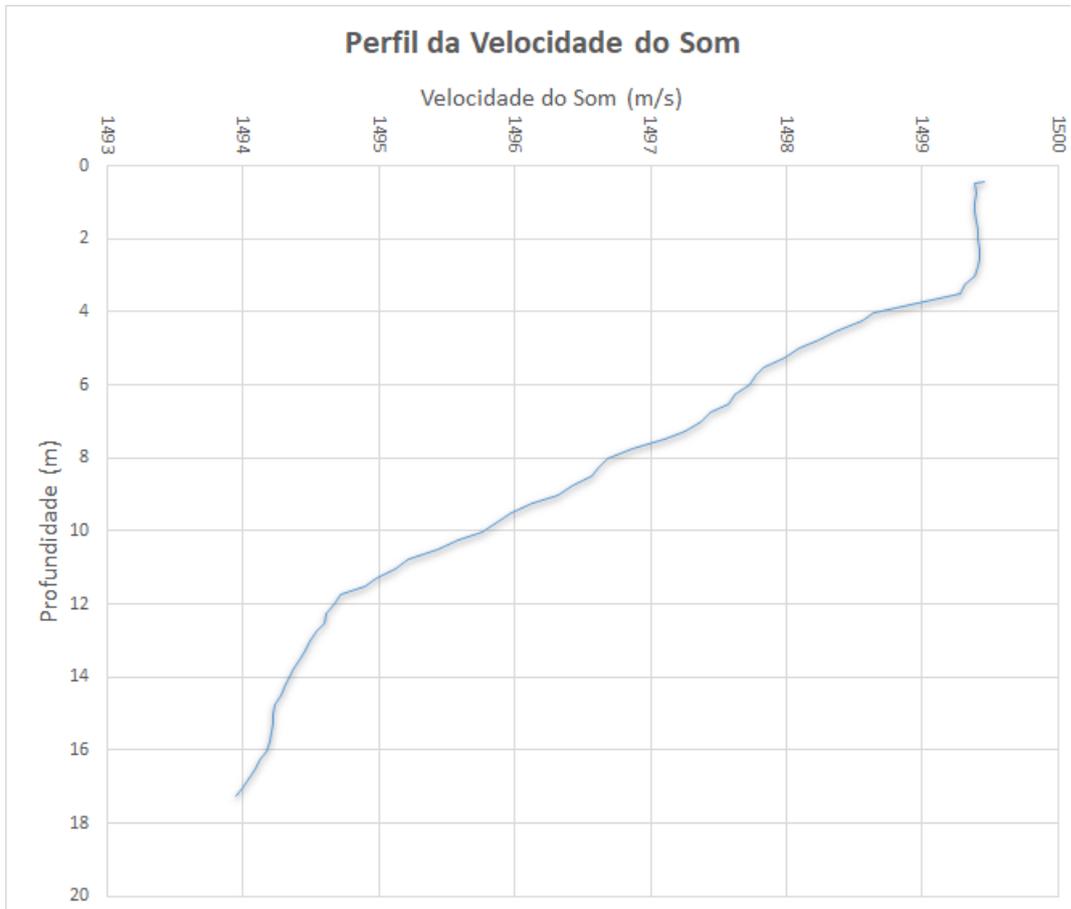
Figura 49 – Modelo digital de terreno gerado pelo interpolador *Topo to Raster* ; (A) MDT da batimetria multifeixe; (B) MDT da batimetria monofeixe clássica; (C) MDT da batimetria monofeixe com os periféricos



suavizado será o registro do relevo submerso (FERREIRA et al., 2016).

As maiores profundidades obtidas com a técnica monofeixe, com relação ao multifeixe, foram atribuídos ao movimento da embarcação, e por isso, alguns valores obtidos da diferença entre as duas técnicas apresentou valores negativos. Já na técnica monofeixe com compensador de movimento, não ocorrem valores negativos, indicando que apenas valores iguais ou mais rasos foram obtidos em relação ao multifeixe.

Figura 50 – Gráfico da velocidade do som *versus* profundidade. Em reservatórios o que mais influencia a velocidade de propagação de uma onda acústica é a temperatura, a medida que a profundidade aumenta, a temperatura diminui, e portanto, diminui-se também, a velocidade de propagação.



6 CONCLUSÃO

Este trabalho mostra os diferentes fatores técnicos e morfológicos que influenciam o resultado no cálculo de volume de reservatórios. Foram observadas as influências das técnicas de aquisição (e. g. equipamentos, configurações e diretrizes de aquisição nos espaçamentos topobatimétricos) e processamento dos dados (e. g. interpolação) até as características morfológicas dos reservatórios e rios alagados, como a complexidade de terreno e sinuosidade, por exemplo.

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que:

- Maiores espaçamentos entre as seções topobatimétricas resultam em menores volumes calculados, subestimando a capacidade dos reservatórios.
- A análise de correlação entre o espaçamento e o volume calculado aponta para uma regressão com proporcionalidade inversa entre a variável dependente (o volume) e a independente (o espaçamento); variando a inclinação da linha de tendência para cada reservatório. A variabilidade da inclinação indica uma correlação com o índice de complexidade, uma vez que os reservatórios com os maiores valores de Índice composto de complexidade de terreno (Rio das Pedras e Irapé) são também os que evidenciam maior taxa de redução do volume em função do incremento no espaçamento das seções;
- Entre os dois métodos de interpolação utilizados, o *Topo to Raster* melhor representou o fundo em comparação com o interpolador *TIN*, mas para isso devem-se utilizar as linhas de drenagem para melhorar o cálculo do volume. Quando as linhas de drenagem não são previamente conhecidas, será necessário realizar a interpolação em duas etapas, sendo a primeira voltada ao reconhecimento e digitalização das drenagens seguido de uma re-interpolação.
- Os métodos de aquisição batimétrica monofeixe e multifeixe não mostram diferença significativa no cálculo de volume quando em reservatórios de baixa complexidade de fundo e/ou baixas profundidades (<40m), ao passo que em reservatório com maior complexidade de fundo e/ou altas profundidades, a técnica monofeixe promove erros significativos nos resultados de volume.

Dessa forma, esse trabalho contribui para a discussão das problemáticas enfrentadas na gestão e manejo dos reservatórios e nas diretrizes para obtenção de resultados confiáveis no cálculo de volume e capacidade de armazenamento dos reservatórios hídricos.

Futuramente, outros métodos de interpolação (kriging, curvatura mínima e vizinho mais próximo) poderão ser avaliados com a mesma técnica.

Recomenda-se que após realizado um levantamento multifeixe em determinado reservatório deva-se criar uma equação que defina uma distância máxima entre seções específica para os próximos levantamentos. Podendo assim, nos próximos trabalhos, utilizar a técnica monofeixe, tornando o levantamento mais ágil e com garantia de uma boa precisão no cálculo de volume.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Orientações para atualização das curvas cota x área x volume*. [S.l.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 29.
- ALCÂNTARA, E. et al. Integrating historical topographic maps and srtm data to derive the bathymetry of a tropical reservoir. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 389, n. 3-4, p. 311–316, 2010. Citado na página 25.
- CARVALHO, N. de O. *Hidrossedimentologia prática*. Segunda. [S.l.]: Editora Interciência, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- CASAMITJANA, X. et al. Effects of the water withdrawal in the stratification patterns of a reservoir. *Hydrobiologia*, Springer, v. 504, n. 1-3, p. 21–28, 2003. Citado na página 25.
- DAWSON, C. *Evaluating Landscape Architectural Grading Designs with a Terrain Complexity Index*. Tese (Doutorado) — School of Environmental Design and Rural Development, 2016. Citado na página 43.
- DHN. *Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos*. Normam-25/dhn. [S.l.], 2017. Citado na página 36.
- EL-HATTAB, A. I. Single beam bathymetric data modelling techniques for accurate maintenance dredging. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, Elsevier BV, v. 17, n. 2, p. 189–195, dec 2014. Citado na página 33.
- ESRI. 2018. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>>. Citado na página 45.
- FELGUEIRAS, C. A. *Desenvolvimento de um sistema de modelagem digital de terreno para microcomputadores*. [S.l.]: INPE, 1987. Citado na página 38.
- FERRARI, R. L. Reconnaissance techniques for reservoir surveys. *US Bureau of Reclamation*, p. 139, abr. 2006. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 38.
- FERREIRA, Í. O. et al. Modelo de incerteza para sondadores de feixe simples. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 68, n. 5, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 95.
- FRIEND, P. F.; SINHA, R. Braiding and meandering parameters. *Geological Society, London, Special Publications*, Geological Society of London, v. 75, n. 1, p. 105–111, 1993. Citado na página 46.
- FURNANS, J. *HydroEdit User's Manual*. [S.l.], 2006. Citado na página 38.
- FURNANS, J.; AUSTIN, B. Hydrographic survey methods for determining reservoir volume. *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, v. 23, n. 2, p. 139–146, 2008. Citado na página 25.
- GAO, J. Impact of sampling intervals on the reliability of topographic variables mapped from grid dems at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science*, Taylor & Francis, v. 12, n. 8, p. 875–890, 1998. Citado na página 45.

- GERGES, S. N. Y. *Ruído: fundamentos e controle*. Segunda. Florianópolis, Brasil: NR Editora, 1992. Citado na página 30.
- HENGL, T. *A practical guide to geostatistical mapping*. [S.l.]: Hengl Amsterdam, 2009. v. 52. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- HUAXING, L. Modelling terrain complexity. In: *Advances in digital terrain analysis*. [S.l.]: Springer, 2008. p. 159–176. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 82.
- HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 106, n. 3-4, p. 211–232, 1989. Citado na página 40.
- IHO. *C-13: IHO Manual on Hydrography*. International hydrographic bureau. Mônaco, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- KEARNS, T. A.; BREMAN, J. Bathymetry-the art and science of seafloor modeling for modern applications. *Ocean globe*, ESRI press, p. 1–36, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. *Digital terrain modeling: principles and methodology*. [S.l.]: CRC press, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 41.
- LOPES, J. E. G.; SANTOS, R. C. P. *Capacidade de reservatórios*. 2002. Citado na página 25.
- MATOS, A. J. S. *Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional CAV-NH*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 25, 38 e 41.
- MATOS, A. J. S.; ESTIGONI, M. V.; MAUAD, F. F. Variação de volume calculado em grandes reservatórios utilizando diferentes metodologias de levantamentos batimétricos. 2011. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 41.
- MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. *The Digital Terrain Model: Theory & Application*. [S.l.]: MIT Photogrammetry Laboratory, 1958. Citado na página 38.
- MORRIS, G. L.; FAN, J. *Reservoir sedimentation handbook*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1997. v. 15. Citado na página 29.
- MURPHY, A. H.; EPSTEIN, E. S. Skill scores and correlation coefficients in model verification. *Monthly weather review*, v. 117, n. 3, p. 572–582, 1989. Citado na página 70.
- NEAGLEY, R. L.; EVANS, N. D. *Handbook for effective supervision of instruction*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1980. Citado na página 44.
- ODOM. *ECHOTRAC CV100 USER MANUAL*. [S.l.], 2008. Citado na página 55.
- PAVÃO, C. G. et al. *Metodologias de interpolação espacial aplicada a dados de espessura crustal na Bacia do Paraná*. [S.l.], 2011. Citado na página 38.
- RATKOWSKY, D. A. Principles of nonlinear regression modeling. *Journal of Industrial Microbiology*, Springer, v. 12, n. 3-5, p. 195–199, 1993. Citado na página 78.

- RIOS, M. A. Cartografia geotécnica e visões fractais da geometria do relevo. 2012. Citado na página 44.
- RISTOW, J. P. *Estudo e desenvolvimento de algoritmos de sonar ativo para o mapeamento de áreas submersas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Citado na página 31.
- SAITO, N. S. *Modelos digitais de elevação na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre-Espírito Santo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2011. Citado na página 39.
- SOUZA, L. A. P. de. *Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 29, 32 e 34.
- STREET, W. *Multibeam Sonar Theory of Operation*. East Walpole, MA, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33.
- SUI, G. et al. Data analysis of elevation standard deviation classifying geomorphological types. In: IEEE. *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010)*. [S.l.], 2010. v. 15, p. V15–294. Citado na página 44.
- TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 106, n. D7, p. 7183–7192, 2001. Citado na página 89.
- TUNDISI, J. G. *Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez—São Carlos: RiMa*. [S.l.]: IEE, 2003. Citado na página 25.
- TWDB. *Volumetric and Sedimentation Survey of Lake Fork Reservoir*. 2009. The Texas Water Development Board. Citado na página 39.
- TWDB. *Application of new procedures to re-assess reservoir capacity*. 2016. The Texas Water Development Board. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- URICK, R. J. *Principles of underwater sound*. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 1983. Citado na página 30.
- USACE. *Reservoir Sedimentation Surveys*. Engineer manual no 1110-2-1003. Washington, D. C., 2004. Citado na página 38.
- USACE. *Hydrographic Surveying*. Engineer manual n. 1110-2-1003. Washington, D. C., 2013. Citado na página 36.
- WCD. *Dams and development: A new framework for decision-making: The report of the world commission on dams*. [S.l.]: Earthscan, 2000. Citado na página 25.
- WILSON, J. T.; MORLOCK, S. E.; BAKER, N. T. *Bathymetric surveys of Morse and Geist Reservoirs in central Indiana made with acoustic Doppler current profiler and global positioning system technology, 1996*. [S.l.]: US Department of the Interior, US Geological Survey, 1997. Citado na página 25.
- WILSON, M. F. et al. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Marine Geodesy*, Taylor & Francis, v. 30, n. 1-2, p. 3–35, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

XIAOQING, Y.; YANG, X. *Manual on sediment management and measurement*. [S.l.]: Secretariat of the World Meteorological Organization Geneva, 2003. Citado na página 27.

YANG, C. T. *Erosion and sedimentation manual*. Denver, Colorado, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.