



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmicas

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 224

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE MÉTODOS DE
INTERPOLAÇÃO DE DADOS BATIMÉTRICOS E
CÁLCULO DE VOLUME DE RESERVATÓRIOS**

JÚLIA MARIA SOJA SAMPAIO

Área de Concentração: Geofísica

Brasília – DF, janeiro de 2024

JÚLIA MARIA SOJA SAMPAIO

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE MÉTODOS DE
INTERPOLAÇÃO DE DADOS BATIMÉTRICOS E
CÁLCULO DE VOLUME DE RESERVATÓRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Área de concentração: Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Marco Ianniruberto (IG/UnB)

Brasília – DF, janeiro de 2024

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SS192a SOJA SAMPAIO, JULIA MARIA
ANÁLISE ESTATÍSTICA DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DE DADOS
BATIMÉTRICOS E CÁLCULO DE VOLUME DE RESERVATÓRIOS / JULIA
MARIA SOJA SAMPAIO; orientador Marco Ianniruberto. --
Brasília, 2024.
72 p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) --
Universidade de Brasília, 2024.

1. Batimetria. 2. Modelo Digital de Terreno. 3.
Geofísica. 4. Reservatórios. 5. Interpoladores. I.
Ianniruberto, Marco, orient. II. Título.

Referência bibliográfica

SAMPAIO, J.M.S. Análise Estatística de Métodos de Interpolação de Dados Batimétricos e Cálculo de Volume de Reservatórios. 2024. 72p. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2024.

Cessão de direitos

NOME DO AUTOR: Júlia Maria Soja Sampaio

TÍTULO DA TESE DE MESTRADO: Análise Estatística de Métodos de Interpolação de Dados Batimétricos e Cálculo de Volume de Reservatórios.

Autorizo a Universidade de Brasília a reprodução parcial ou total desta tese de mestrado por meio eletrônico, impressão e/ou download, para fins de pesquisa e produção científica brasileira. Com obrigatoriedade de citação da obra.

Grau: Mestre Ano: 2024

JÚLIA MARIA SOJA SAMPAIO

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DE DADOS BATIMÉTRICOS E CÁLCULO DE VOLUME DE RESERVATÓRIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Área de concentração: Geofísica.

APROVADA EM 31 DE JANEIRO DE 2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marco Ianniruberto (Orientador) – Presidente da Banca
Instituto de Geociências/Universidade de Brasília (IG/UnB)

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig – Examinador Interno
Instituto de Geociências/Universidade de Brasília (IG/UnB)

Prof. Dr. Gervásio Barbosa Soares Neto – Examinador Externo
Instituto Federal de Brasília – IFB

BRASÍLIA – DF, 31 DE JANEIRO DE 2024

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus, que não me permitiu desistir em momento algum, mesmo nos dias mais difíceis. Somente Ele sabe o que nós realmente sentimos e passamos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais Alexandre e Cristina que me guiaram desde minha infância e me criaram como uma pessoa perseverante e forte. Ao meu marido, Gustavo, por sempre esteve ao meu lado para ouvir, consolar e dar forças, ele sempre sabe o que comentar e opinar.

Muito importante também agradecer ao meu orientador, Professor Marco, que persistiu para que conseguíssemos finalizar esse trabalho e acreditou no meu potencial para execução deste trabalho.

Durante meu período acadêmico trabalhei em duas empresas as quais gostaria de agradecer por terem disponibilizado o tempo necessário para realização deste mestrado. À Agência Nacional de Aguas por ter cedido os dados do meu trabalho, em especial minha antiga gestora, Simone, por ter apoiado meu mestrado. E à Rural Tech, por ter cedido computadores para o processamento de dados, e a toda equipe Rural Tech pelo apoio.

Agradeço ao Paulo Franca por ter me auxiliado diversas vezes em processamentos e dúvidas durante o mestrado.

A Universidade de Brasília e ao Instituto de Geociências pelos recursos oferecidos e as ótimas disciplinas que fiz ao longo do mestrado.

Muito obrigada a todos que contribuíram!

Conforme a Portaria 206 de 4 de setembro de 2018, que dispõe de obrigatoriedade de citação da CAPES. Firmo aqui que: “o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

RESUMO

O Brasil possui uma matriz energética fortemente baseada em recursos renováveis, sendo as hidroelétricas a componente majoritária. As usinas hidrelétricas são formadas pelo represamento do curso natural de um rio, provocando mudanças no regime hidrossedimentológico original. Em particular ao chegar no reservatório, os sedimentos transportados pelos rios se depositam, o que diminui a capacidade de armazenamento. Entender como varia o volume dos reservatórios no tempo é fundamental para definir o potencial de geração e a vida útil do empreendimento. Com o objetivo de estimar a variação do volume dos reservatórios foram adquiridos dados batimétricos, a partir dos quais foram gerados Modelos Digitais de Terreno (MDTs). Os modelos foram processados no software GIS utilizando cinco tipos de interpoladores diferentes: IDW, RBF, *Topo to Raster*, UK e *Global Polynomial Interpolation*. Adicionalmente, foi realizada análise do impacto do espaçamento das linhas batimétricas transversais na estimativa do volume, a qual mostrou que o volume calculado diminui ao aumentar do espaçamento das linhas de aquisição. A partir da observação da variabilidade do volume entre os reservatórios analisados, foi realizado outro estudo correlacionando a morfologia dos reservatórios, com Índices de Complexidade de Terreno, calculados pelo software GIS. A análise estatística identificou grupos de reservatórios com características diferentes, explicando que a variabilidade da estimativa do volume depende da morfologia do fundo. Analisando as localizações constatou-se que os grupos de reservatórios estão localizados em bacias hidrográficas diferentes, que possuem características morfológicas distintas. A seguir foi realizado estudo sobre o impacto do método de interpolação sobre o cálculo do volume dos reservatórios. Considerando cinco interpoladores e onze espaçamentos, observou-se que quanto maior o afastamento das seções, maior a discrepância na estimativa do volume. Além disso, constatou-se que diferentes interpoladores produzem diferentes estimativas de volume, afirmando a importância de estudos prévios para alocar as seções batimétricas e escolher o método de interpolação mais robusto.

Palavras-Chave: Batimetria, Modelo Digital de Terreno, Geofísica, Reservatórios.

ABSTRACT

Brazil has an energy matrix heavily based on renewable resources, with hydroelectric power being the predominant component. Hydroelectric plants are formed by damming the natural course of a river, causing changes in the original hydrosedimentological regime. Particularly when reaching the dam, sediments transported by rivers deposit, reducing the storage capacity. Understanding how reservoir volumes vary over time is crucial to define the generation potential and the lifespan of the project. In order to estimate the variation in reservoir volumes, bathymetric data were acquired, from which Digital Terrain Models (DTMs) were generated. The models were processed in ArcGIS software using five different types of interpolators. Additionally, an analysis of the impact of the spacing of control bathymetric lines on volume estimation was carried out, showing that the calculated volume decreases with increasing spacing of control lines. Based on the observation that the rate of volume variation shows variability among the analyzed reservoirs, a further study was conducted correlating reservoir morphology with Terrain Complexity Index, calculated by ArcGIS software. Statistical analysis identified groups of reservoirs with analogous characteristics, explaining that the variability in volume estimation depends on the bottom morphology. Analyzing the locations, it was found that reservoir groups are located in different hydrographic basins with distinct morphological characteristics. A subsequent study was conducted on the impact of the interpolation method on reservoir volume calculation. Considering five interpolators and eleven spacings, it was observed that the greater the distance between sections, the greater the discrepancy in volume estimation. Furthermore, it was found that different interpolators produce different volume estimates, emphasizing the importance of preliminary studies to allocate bathymetric sections and choose the most robust interpolation method.

Keywords: Bathymetry, Digital Terrain Model, Geophysics, Reservoirs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do reservatório de acumulação.	15
Figura 2 – Representação esquemática do reservatório fio d' água.....	16
Figura 3 – Representação da aquisição batimétrica monofeixe (MINHONI, 2017).....	17
Figura 4 – Representação da aquisição batimétrica multifeixe (https://www.hm.eng.br/blog/batimetria.html).....	17
Figura 5 – Representação de interpoladores exatos (COSTA, 2015)	19
Figura 6 – Representação de interpoladores não exatos (COSTA, 2015).....	19
Figura 7 – Representação de interpoladores globais (COSTA, 2015).....	20
Figura 8 – Representação de interpoladores locais (COSTA, 2015).....	20
Figura 9 – (A) Superfície convexa com valores positivos. (B) Superfície côncava com valores negativos. (C) Superfície linear com valor zero. Fonte: ARCMAP	23
Figura 10 – Imagem representativa dos pixels de um raster, onde Z é o valor do pixel. A célula está em um sistema de coordenadas local x e y referenciados a célula central, utilizando a fórmula $N=(n-1)/2$ para as demais janelas. Sendo que n pode ser qualquer inteiro ímpar menor que o número de células de menor lado do raster (Wilson 2007).....	24
Figura 11 – Mapa de localização UHE Água Vermelha (Fonte: elaboração própria).....	26
Figura 12 – Mapa de localização UHE Bariri (Fonte: elaboração própria).....	27
Figura 13 – Mapa de localização UHE Caconde (Fonte: elaboração própria) ..	28
Figura 14 – Mapa de localização UHE Canoas I (Fonte: elaboração própria) ..	29
Figura 15 – Mapa de localização UHE Canoas II (Fonte: elaboração própria) .	30
Figura 16 – Mapa de localização UHE Capivara (Fonte: elaboração própria) ..	31
Figura 17 – Mapa de localização UHE Chavantes (Fonte: elaboração própria)	32
Figura 18 – Mapa de localização UHE Ibitinga (Fonte: elaboração própria)	33

Figura 19 – Mapa de localização UHE Irapé (Fonte: elaboração própria)	34
Figura 20 – Mapa de localização UHE Jaguara (Fonte: elaboração própria)	35
Figura 21 – Mapa de localização UHE Rosana (Fonte: elaboração própria)	36
Figura 22 – Gráfico dos Índices dos Reservatórios (Fonte: elaboração própria)	47
Figura 23 – Gráfico dos Índices dos Reservatórios sem as UHEs Caconde e Irapé (Fonte: elaboração própria)	47
Figura 24 – Gráfico dos Índices dos Reservatórios da Bacia do Grande (Fonte: elaboração própria)	49
Figura 25 – Gráfico dos Índices dos Reservatórios da Bacia do Tietê (Fonte: elaboração própria)	49
Figura 26 – Gráfico dos Índices dos Reservatórios da Bacia do Paranapanema (Fonte: elaboração própria)	50
Figura 27 – Resultados UHE Irapé com cinco interpoladores (Fonte: elaboração própria)	53
Figura 28 – Resultados UHE Água Vermelha (Fonte: elaboração própria)	53
Figura 29 – Resultados UHE Bariri (Fonte: elaboração própria)	54
Figura 30 – Resultados UHE Caconde (Fonte: elaboração própria)	54
Figura 31 – Resultados UHE Canoas I (Fonte: elaboração própria)	54
Figura 32 – Resultados UHE Canoas II (Fonte: elaboração própria)	55
Figura 33 – Resultados UHE Capivara (Fonte: elaboração própria)	55
Figura 34 – Resultados UHE Chavantes (Fonte: elaboração própria)	55
Figura 35 – Resultados UHE Ibitinga (Fonte: elaboração própria)	56
Figura 36 – Resultados UHE Irapé (Fonte: elaboração própria)	56
Figura 37 – Resultados UHE Jaguara (Fonte: elaboração própria)	56
Figura 38 – Resultados UHE Rosana (Fonte: elaboração própria)	57
Figura 39 – Resultados UHE Rosana (Fonte: França, 2019)	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos Índices de Complexidade do Terreno	43
Tabela 2 – Autovalor e porcentagem de variação dos índices da complexidade do terreno.....	52
Tabela 3 – Espaçamento das linhas de sondagem	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Ficha técnica UHE Água Vermelha (Fonte: METADADOS ANA)...	26
Quadro 2 – Ficha técnica UHE Bariri (Fonte: METADADOS ANA).....	27
Quadro 3 – Ficha técnica UHE Caconde (Fonte: METADADOS ANA)	28
Quadro 4 – Ficha técnica UHE Canoas I (Fonte: METADADOS ANA)	29
Quadro 5 – Ficha técnica UHE Canoas II (Fonte: METADADOS ANA)	30
Quadro 6 – Ficha técnica UHE Capivara (Fonte: METADADOS ANA)	31
Quadro 7 – Ficha técnica UHE Chavantes (Fonte: METADADOS ANA)	32
Quadro 8 – Ficha técnica UHE Ibitinga (Fonte: METADADOS ANA)	33
Quadro 9 – Ficha técnica UHE Irapé (Fonte: METADADOS ANA)	34
Quadro 10 – Ficha técnica UHE Jaguará (Fonte: METADADOS ANA)	35
Quadro 11 – Ficha técnica UHE Rosana (Fonte: METADADOS ANA)	36
Quadro 12 – Relação de equipamentos utilizados.....	37
Quadro 13 – Localização de cada Usina de acordo com a Bacia e Rio.....	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Cluster (Fonte: elaboração própria)	51
Gráfico 2 – Componentes Principais (Fonte: elaboração própria).....	51

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. RESERVATÓRIOS	14
2.2. BATIMETRIA	16
2.3. MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO	18
2.3.1. INTERPOLADORES EXATOS	18
2.3.2. INTERPOLADORES NÃO EXATOS	19
2.3.3. INTERPOLADORES GLOBAIS	19
2.3.4. INTERPOLADORES LOCAIS	20
2.3.5. INTERPOLADORES DETERMINÍSTICOS	21
2.3.6. INTERPOLADORES GEOESTATÍSTICOS	21
2.4. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA COMPLEXIDADE DO TERRENO	21
2.4.1. DESVIO PADRÃO DA DECLIVIDADE	22
2.4.2. CURVATURA TOTAL	22
2.4.3. DIFERENÇA DE ALTURA LOCAL	23
2.4.4. RUGOSIDADE	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. ÁREAS DE ESTUDO	26
UHE Água Vermelha	26
UHE Bariri	27
UHE Caconde	28
UHE Canoas I	29
UHE Canoas II	30
UHE Capivara	31

UHE Chavantes	32
UHE Ibitinga.....	33
UHE Irapé.....	34
UHE Jaguará.....	35
UHE Rosana	36
3.2. EQUIPAMENTOS e AQUISIÇÃO DE DADOS	37
3.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS	38
3.4. SIMULAÇÃO DE LINHAS MONOFEIXE	38
3.5. INTERPOLAÇÃO DOS DADOS	39
3.6. CÁLCULO DO VOLUME.....	39
3.7. CLASSIFICAÇÃO ESTATÍSTICA MULTIVARIADA.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1. CÁLCULO DOS MDTS.....	41
4.2. CÁLCULO DOS ÍNDICES	42
4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA	50
4.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS MONOFEIXE E MULTIFEIXE	52
5. CONCLUSÃO	59
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
7. LISTA DE ANEXOS	65
7.1. DADOS TABULARES ÍNDICES	65
7.2. DADOS TABULARES DAS FERRAMENTAS DE INTERPOLAÇÃO	67

1. INTRODUÇÃO

Devido seu posicionamento geográfico e seu clima predominante, o Brasil possui uma grande rede de drenagem em todo seu território. Tendo em vista que a água doce é considerada como um recurso mineral finito, é importante a conscientização para preservação (MATOS et al., 2011). Segundo Pasqualetto (2022) o uso da água para irrigação aumentou 1289,9% entre 1960 e 2020, seguindo das demais demandas como abastecimento urbano, abastecimento rural, indústria, mineração, termelétricas e uso animal.

O armazenamento da água é realizado para atender diversos propósitos, dentre eles a geração de energia hidrelétrica. A estrutura da Usina Hidrelétrica (UHE) é composta por uma barragem implantada no curso da água, possibilitando o armazenamento em reservatório. Porém, junto com a água, também são retidos sedimentos, visto que ocorre uma diminuição da capacidade de transporte do fluxo de água (LOPES; SANTOS, 2002). Segundo Perera (2023), independentemente do tamanho ou tipo do reservatório, a sedimentação ocorrerá, afetando diretamente a vida útil do empreendimento. Adicionalmente, sedimentos abrasivos podem danificar turbinas, mecanismos e, conseqüentemente, diminuir a eficiência da geração de energia.

É de suma importância que ocorra o monitoramento do volume e área dos reservatórios para que seja feita uma estimativa do assoreamento, a fim de evitar problemas futuros, como por exemplo, a desativação da Usina por estar assoreada, impossibilitando sua função (MATOS et al., 2011). Visando acompanhar o processo de assoreamento a Agência Nacional de Águas (ANA) e a ANEEL publicaram em 14 de dezembro de 2022 a Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 127. 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) (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2022). As Usinas Hidrelétricas estão realizando aquisições batimétricas e topográficas para avaliar a taxa de sedimentações nos reservatórios.

A partir dos dados adquiridos já adquiridos questionou-se a precisão e aderência entre os resultados gerados com a real capacidade dos

reservatórios. Portanto, o objetivo deste trabalho consiste na comparação entre diferentes estratégias de aquisição de dados batimétricos e diferentes algoritmos de modelagem espacial, visando estimar o impacto sobre a estimativa da capacidade de um reservatório. Os dados utilizados para a pesquisa foram adquiridos previamente pelas empresas responsáveis pelas UHEs consideradas, em atendimento à citada resolução ANA/ANEEL. Todos os levantamentos utilizaram o método acústico de batimetria para aferir as espessuras das lâminas d'água.

O trabalho está norteado pelas seguintes perguntas: 1) Quais os métodos de interpolação matemática melhor representam a morfologia e o volume do reservatório? 2) Qual a influência na estimativa do volume de acordo com a mudança no espaçamento das linhas de aquisição?

A hipótese desse trabalho defende que os valores obtidos no cálculo de volume estarão diretamente relacionados com a estratégia de amostragem e com o tipo de interpolação utilizados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. RESERVATÓRIOS

Os reservatórios de água são utilizados por múltiplos propósitos, com diversas finalidades como por exemplo: abastecimentos urbano e agrícola, controle de nível d'água e de cheias, geração hidrelétrica, lazer, piscicultura, aquicultura e navegação (LOPES; SANTOS, 2002). Segundo Souza (2006), os reservatórios possuem como finalidade básica a acumulação de água, compensando as faltas de chuvas durante os períodos de seca. Eles são gerados a partir de barragens, construídas para represar cursos de água.

Dentro do estudo e monitoramento dos recursos hídricos, um dos processos a serem avaliados é a variação do volume útil dos reservatórios de água. A determinação do volume útil de uma hidrelétrica é estimada na fase de seu pré-enchimento, além disso é gerada a relação cota/volume utilizada durante sua operação (MATOS, 2012). A capacidade de armazenamento está diretamente relacionada com as características físicas da área de localização, tais como a variação de elevação do terreno, o qual implica diretamente no volume de água armazenado (SOUZA, 2006). Devido à diminuição da

velocidade do fluxo da água em decorrência das barragens há intensificação da deposição de material sólido, tornando as condições dos reservatórios favoráveis ao assoreamento. A sedimentação de tais materiais ocorre de forma irregular ao longo do reservatório, normalmente de maior intensidade de montante para jusante (LOPES; SANTOS, 2002).

Isso significa que a capacidade de armazenamento dos reservatórios de água é reduzida gradativamente com a deposição de sedimentos que ocorre ao longo do tempo. Estimativas atuais das capacidades dos reservatórios que não possuem novos levantamentos recentes, as vezes desde sua construção, podem apresentar variações bastante significativas (FURNANS; AUSTIN, 2008).

Os reservatório podem ser classificados em dois tipos: reservatório de acumulação (Figura 1) e reservatório fio d' água (Figura 2). O primeiro pode ser caracterizado por possuir dimensão para fornecer energia constante e nos períodos de seca tem capacidade de manter a afluência necessária para as próximas usinas. São usinas com reservatório de acumulação: UHE Água Vermelha, UHE Caconde, UHE Capivara, UHE Chavantes e UHE Irapé. Reservatório fio d' água não possuem a capacidade de acumulação e toda água que chega deve ser turbinada ou vertida, são classificados fio d' água: UHE Bariri, UHE Canoas I, UHE Canoas II, UHE Ibatinga, UHE Jaguará e UHE Rosana.

Figura 1 - Representação esquemática do reservatório de acumulação.

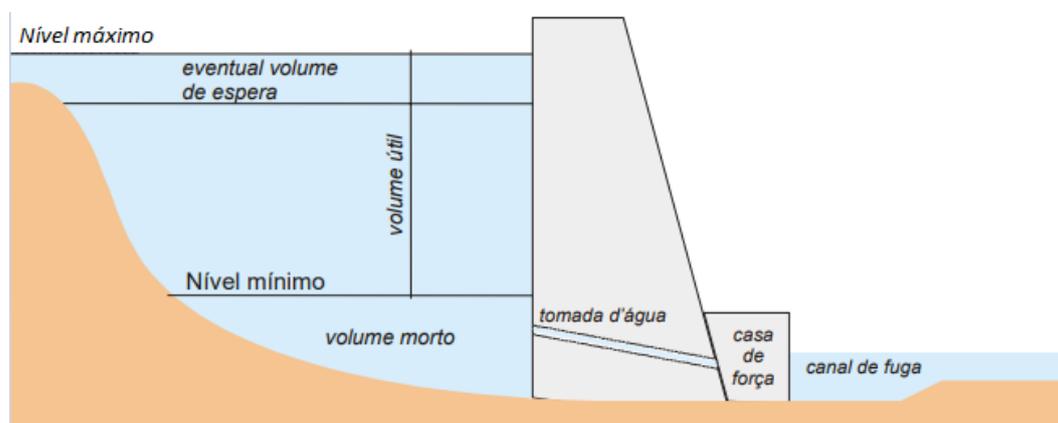
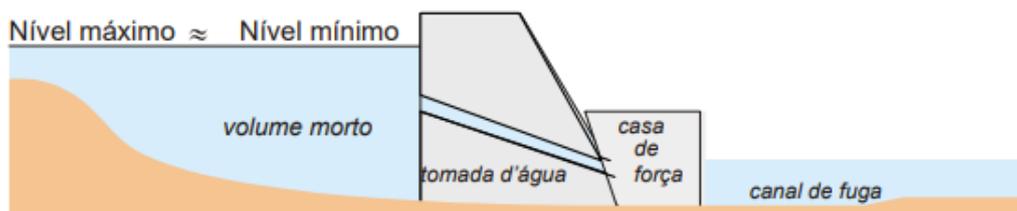


Figura 2 – Representação esquemática do reservatório fio d' água.



Perera (2023) realizou um estudo de previsão de assoreamento de reservatórios por diversos países, incluindo o Brasil. Seu trabalho estimou que entre o período de 2022 e 2050 as barragens vão perder cerca de 23% de suas capacidades. Além disso, anualmente é esperado que ocorra uma diminuição de 0,2% ao ano devido a sedimentação.

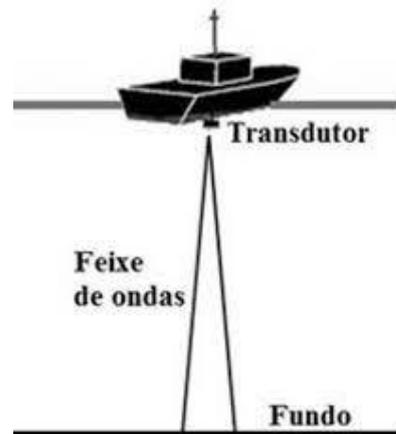
Segundo Silveira (2021), a deterioração dos solos da bacia hidrográfica está entre as principais fontes de sedimentos devido à erosão. Este processo possui dois fatores: endógenos e exógenos, caracterizados por razões internas como clima, rios, correntes marítimas, e por razões externas, como ação dos ventos, animais e vulcanismo, respectivamente. É possível classificar os mecanismos de transporte de sedimentos em três tipos: carga de leito, carga em suspensão e material dissolvido. O primeiro tipo refere-se ao transporte de material por saltação, rolamento e arraste no leito do rio, o segundo remete a camada em suspensão do material na água, o terceiro retrata os materiais dissolvidos na água. Em complementação, segundo Suguio (2003), as partículas sedimentares tais como areia, cascalho e partículas argilosas decorrentes da erosão presentes nos rios são transportadas através de mecanismos mecânicos e hidráulicos.

2.2. BATIMETRIA

O levantamento do mapeamento da subsuperfície da água, pode ser realizado utilizando dois métodos diferentes, o Single Beam e Multi Beam. O sistema Single Beam Sonar emite um pulso acústico, que se propaga na lâmina d'água até atingir o assoalho do corpo hídrico, onde reflete e volta para a superfície, sendo detectado pelo receptor. A partir da medida do tempo duplo de percurso (Δt), a profundidade é calculada pela fórmula $h=c\Delta t/2$, onde c é a velocidade de propagação das ondas acústicas na água. A estratégia de aquisição dos dados batimétricos é caracterizada por linhas de sondagem,

sendo que o equipamento emite e recebe o pulso a intervalos de tempo constantes ao decorrer do deslocamento do barco (LI et al., 2023) (Figura 3).

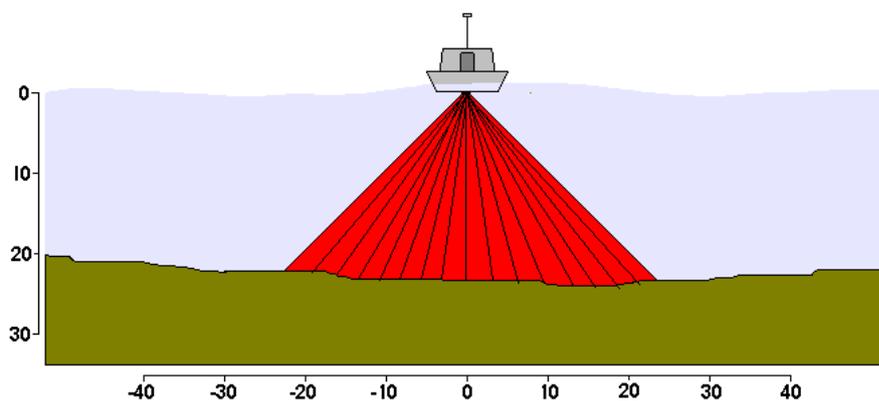
Figura 3 – Representação da aquisição batimétrica monofeixe (MINHONI, 2017)



O sonar Multi Beam segue o princípio de aquisição semelhante ao anterior, sua característica diferencial é múltipla recepção de feixes. O sonar possui um ângulo de abertura em transmissão que permite cobrir uma área maior (LEVIN et al., 2019) (Figura 4). A vantagem dessa metodologia é uma alta resolução vertical e uma alta densidade de pontos de sondagem (WOLFL, et al., 2019).

Figura 4 – Representação da aquisição batimétrica multifeixe

(<https://www.hm.eng.br/blog/batimetria.html>)



Segundo Souza (2006), o mapeamento batimétrico possui como uma de suas funções a análise de processos erosivos e de assoreamento, a partir de comparações entre diferentes aquisições. Um dos procedimentos realizados em reservatórios é o monitoramento da morfologia do fundo, neste caso é necessário realizar aquisições batimétricas no mesmo local em diferentes

períodos, podendo assim analisar de forma comparativa os dados coletados, visando detectar mudanças associadas à deposição de sedimentos.

2.3. MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

A interpolação é um processo matemático utilizado para estimar valores de uma variável em pontos não amostrados. No caso específico, a interpolação permite passar de uma nuvem de pontos de profundidade com distribuição discreta para uma superfície contínua. Cada método utiliza um algoritmo diferente para a interpolação, gerando diferentes resultados para o mesmo local (AMANTE; EAKINS, 2016). Segundo Druck (2004), uma superfície acurada é obtida a partir de um dado preciso, o modelo preciso gerado é obtido através da análise de diversos tipos de interpoladores. Segundo Costa (2015) os interpoladores podem ser classificados de três formas distintas:

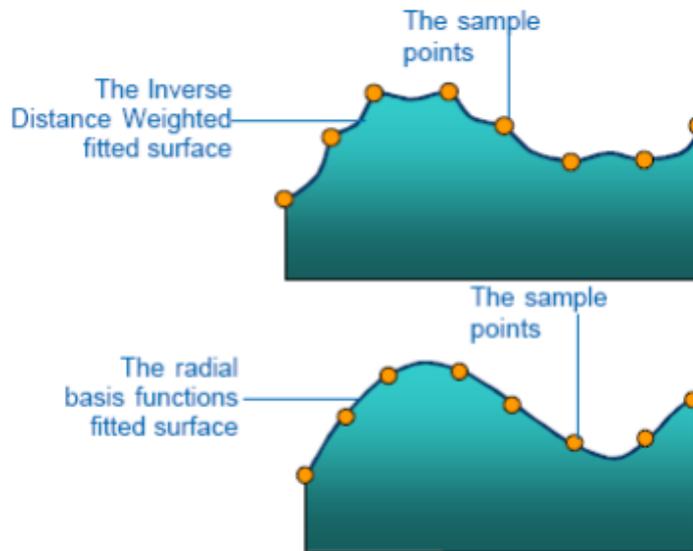
- Exatos x Não exatos;
- Globais x Locais;
- Determinístico x Geoestatístico.

2.3.1. INTERPOLADORES EXATOS

São considerados como exatos os interpoladores que, ao estimar um dado para o modelo, consideram o valor preciso da amostra coletada para o local em análise. Portanto, a superfície interpolada obrigatoriamente honra os valores originais dos dados (Figura 5) (COSTA, 2015).

Exemplos: Inverse Distance Weighting (IDW); Radial Basis Function (RBF) e a maioria dos métodos de Kriging (COSTA, 2015).

Figura 5 – Representação de interpoladores exatos (COSTA, 2015)

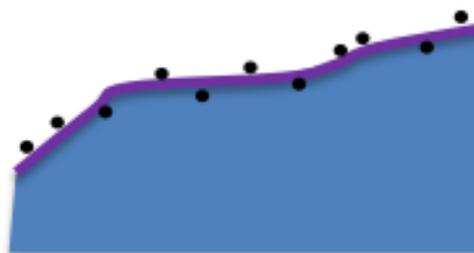


2.3.2. INTERPOLADORES NÃO EXATOS

São classificados com interpoladores não exatos (ou por aproximação) os modelos matemáticos que não mantem os valores iguais aos das amostras observadas. Conseqüentemente, a superfície não honra necessariamente o valor do dado coletado (Figura 6) (COSTA, 2015).

Exemplos: interpolação polinomial e métodos de regressão clássica (COSTA, 2015).

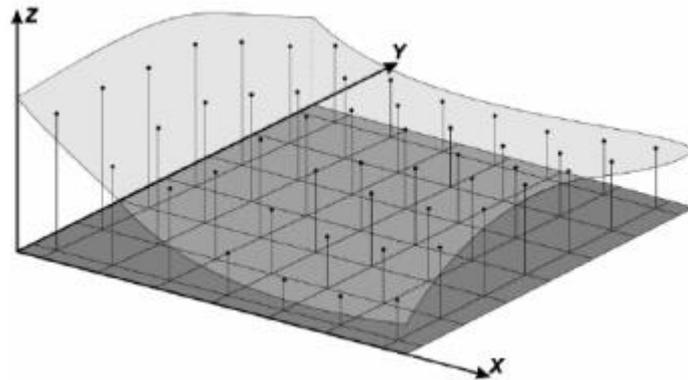
Figura 6 – Representação de interpoladores não exatos (COSTA, 2015)



2.3.3. INTERPOLADORES GLOBAIS

Os interpoladores globais operam considerando todos os pontos da área amostrada, sendo possível interpolar qualquer ponto dentro da área dos dados originais. A função matemática utilizada é um polinômio, normalmente utilizados para modelar curvas e superfícies suaves, analisando a tendência global (Figura 7) (COSTA, 2015).

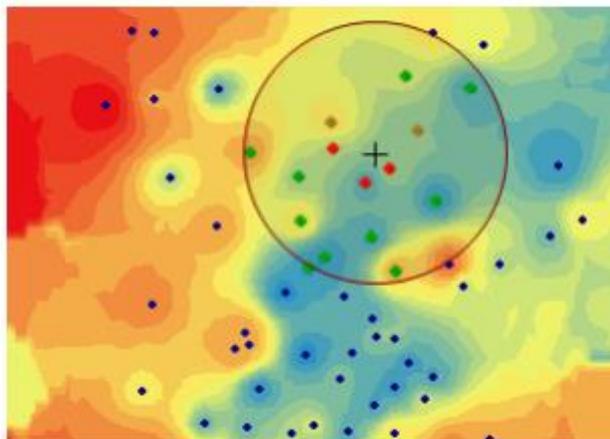
Figura 7 – Representação de interpoladores globais (COSTA, 2015).



2.3.4. INTERPOLADORES LOCAIS

Interpoladores locais utilizam amostras presentes em uma vizinhança próxima para estimar um determinado ponto, utilizando funções que são ajustadas de acordo com a localização. Portanto a influência de cada dado varia de acordo com a distância do ponto calculado (COSTA, 2015). A Figura 8 ilustra como o método é realizado, é possível observar que o valor a ser estimado, o X, será calculado com influência apenas dos dados que estão dentro no círculo da vizinhança.

Figura 8 – Representação de interpoladores locais (COSTA, 2015).



Exemplos: *Inverse Distance Weighting* (IDW); *Radial Basis Function* (RBF) e a maioria dos métodos de *Kriging* (COSTA, 2015).

2.3.5. INTERPOLADORES DETERMINÍSTICOS

Interpoladores determinísticos não utilizam da teoria da probabilidade para determinar o valor do ponto amostral. O cálculo é realizado por combinação linear dos valores amostrados, baseando-se apenas na geometria da distribuição espacial dos dados (MAZZINI, 2009).

Exemplos: *Inverse Distance Weighting* (IDW) e *Radial Basis Function* (RBF) (COSTA, 2015).

2.3.6. INTERPOLADORES GEOESTATÍSTICOS

Além do uso de teoria da probabilidade, o método estocástico incorpora critérios estatísticos na determinação de pesos para cada ponto amostral no cálculo das estimativas. Este método de interpolação pressupõe que cada ponto está associado a uma variável aleatória. Uma grande diferença entre os interpoladores estatísticos e determinísticos é a descrição por leis probabilísticas, baseadas no conceito de variável aleatória (COSTA, 2015).

Segundo Kis (2016) a metodologia do *Universal Kriging* utiliza como método para obtenção dos valores próximos não conhecidos uma média que possui dependência da localização espacial (KIS, 2016).

Exemplos: métodos de *Kriging*, tais como *Ordinary Kriging* – OK, *Simple Kriging* – SK e *Universal Kriging* – UK. (COSTA, 2015).

2.4. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA COMPLEXIDADE DO TERRENO

Segundo Wilson (2007) a análise de terreno possui uma alta relevância para os estudos dos habitats. Sendo possível agrupá-lo quantitativamente utilizando quatro parâmetros importantes para a caracterização do relevo: desvio padrão da declividade, curvatura total, diferença de altura local e rugosidade. Todos os parâmetros foram calculados por diferentes ferramentas em um *software* de GIS. Ao longo do texto serão explicados os cálculos realizados. Tais parâmetros foram selecionados com o objetivo de comparar os resultados com trabalhos já realizados com os mesmos índices.

2.4.1. DESVIO PADRÃO DA DECLIVIDADE

O desvio padrão da declividade é um parâmetro importante para análise da morfologia da região (GANG, 2010). A declividade pode ser definida como a taxa de variação da elevação entre duas células próximas do modelo (ArcGIS Online, 26 OUT. 2021). Seu cálculo ocorre a partir da primeira derivada da elevação (RIOS, 2012) podendo ser considerada como uma variável estatística representada por σ , determinado pela seguinte equação (Equação 1):

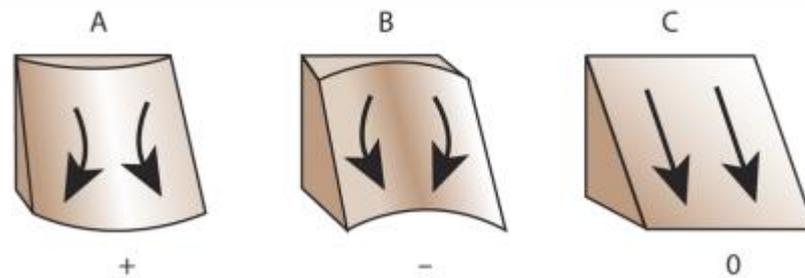
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \text{ (Equação 1)}$$

Onde μ é a média da declividade, x_i representa cada valor da declividade e N o número de pontos na janela móvel (GANG, 2010). O cálculo da declividade foi realizado pela ferramenta *Slope*, dentro do conjunto *3D Analyst*, em um *software* de GIS.

2.4.2. CURVATURA TOTAL

A função da curvatura total da encosta é definida pela característica física da drenagem, a qual pode ser relacionada com o processo de erosão e deposição. A resposta indica a direção máxima do declive, podendo ser côncava com convexa. O cálculo realizado é baseado na segunda derivada da superfície e, como resultado, o modelo apresenta as características básicas de drenagem. A curvatura do rio afeta a aceleração e desaceleração do fluxo d'água, influenciando, portanto, a erosão e deposição de sedimentos (ARCMAP). A Figura 9 demonstra como este índice classifica os dados em positivos e negativos de acordo com o relevo.

Figura 9 – (A) Superfície convexa com valores positivos. (B) Superfície côncava com valores negativos. (C) Superfície linear com valor zero. Fonte: ARCMAP



O cálculo da declividade foi realizado pela ferramenta *Curvature*, dentro do conjunto *3D Analyst*, *software* de GIS.

2.4.3. DIFERENÇA DE ALTURA LOCAL

Segundo Gao (1998) as variáveis topográficas são dependentes da acurácia do dado de origem e, conseqüentemente, afetadas pelo intervalo de amostragem espacial das elevações impactando no desvio padrão da declividade. O cálculo da diferença de altura local foi definido com um índice (ICT_{DAL}), fruto da diferença entre as elevações máximas (H^{max}) e mínimas (H^{min}) de uma janela móvel (GAO, 1998), como descrito na equação a seguir (Equação 2):

$$ICT_{DAL} = H^{max} - H^{min} \text{ (Equação 2)}$$

O cálculo da diferença de altura foi realizado pela ferramenta *Focal Statistics*, dentro do conjunto *Image Analyst Tools*, *software* GIS.

2.4.4. RUGOSIDADE

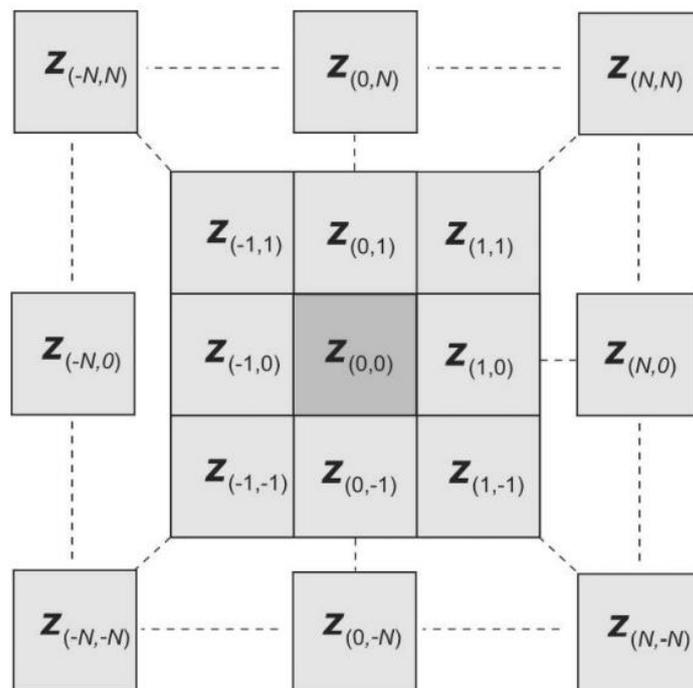
O último índice para o cálculo da complexidade do terreno refere-se à rugosidade, também chamado de *Terrain Ruggedness Index* – TRI. Os MDTs em formato *raster* são caracterizados por pixels com tamanhos definidos com base na resolução do modelo. Segundo Wilson (2007) o índice TRI é o resultado da variação local do terreno em relação a um ponto central (Figura 10). O valor é calculado pela comparação do *pixel* central e seus vizinhos,

utilizando o valor absoluto. O índice é calculado pela seguinte equação (Equação 3):

$$TRI(n) = \frac{(\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N |Z_{ij} - Z_{00}|)}{(n^2 - 1)} \text{ (Equação 3)}$$

Os resultados obtidos por tal método apresentarão valor próximos a 1 em locais planos, enquanto locais com maior relevo apresentarão maior valor.

Figura 10 – Imagem representativa dos pixels de um raster, onde Z é o valor do pixel. A célula está em um sistema de coordenadas local x e y referenciados a célula central, utilizando a fórmula $N=(n-1)/2$ para as demais janelas. Sendo que n pode ser qualquer inteiro ímpar menor que o número de células de menor lado do raster (Wilson 2007)



O cálculo da rugosidade foi realizado por um *scrit* em *Python* adicionado em um *software* de GIS.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados nesse projeto são frutos de trabalhos realizados pelas empresas gestoras das usinas fiscalizadas pela ANA, visando atender a Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 127. Após as análises realizadas pela ANA foram emitidos pareceres técnicos de aprovação e seus resultados foram disponibilizados publicamente no site de METADADOS (<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/b8f0487a-df73-4f8d-8b22-bb49cf9f3683>).

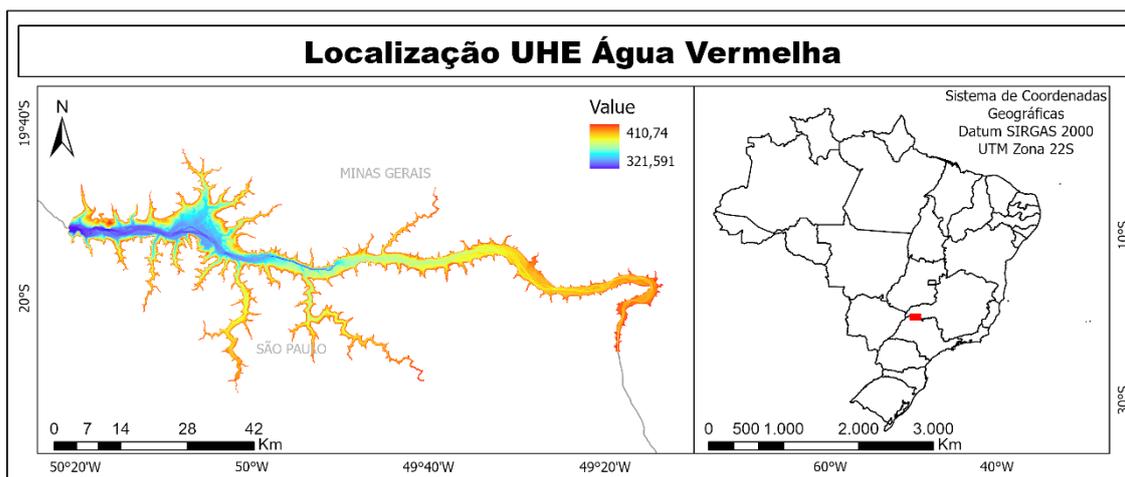
Dentre todos os empreendimentos aprovados, foi realizada uma verificação de quais aquisições foram realizadas com o uso de equipamento multifeixe, considerando que para a análise desse estudo é necessário um levantamento com varredura completa da área. Ao todo foram selecionados 11 (onze) reservatórios: UHE Água Vermelha; UHE Bariri, UHE Caconde, UHE Canoas I, UHE Canoas II, UHE Capivara; UHE Chavantes, UHE Ibitinga, UHE Irapé, UHE Jaguará e UHE Rosana.

3.1. ÁREAS DE ESTUDO

A seguir são apresentados todos os reservatórios, objetos de estudos nesse trabalho. Para cada um é apresentado o mapa de localização e sua respectiva Ficha Técnica (simplificada).

UHE Água Vermelha

Figura 11 – Mapa de localização UHE Água Vermelha (Fonte: elaboração própria)

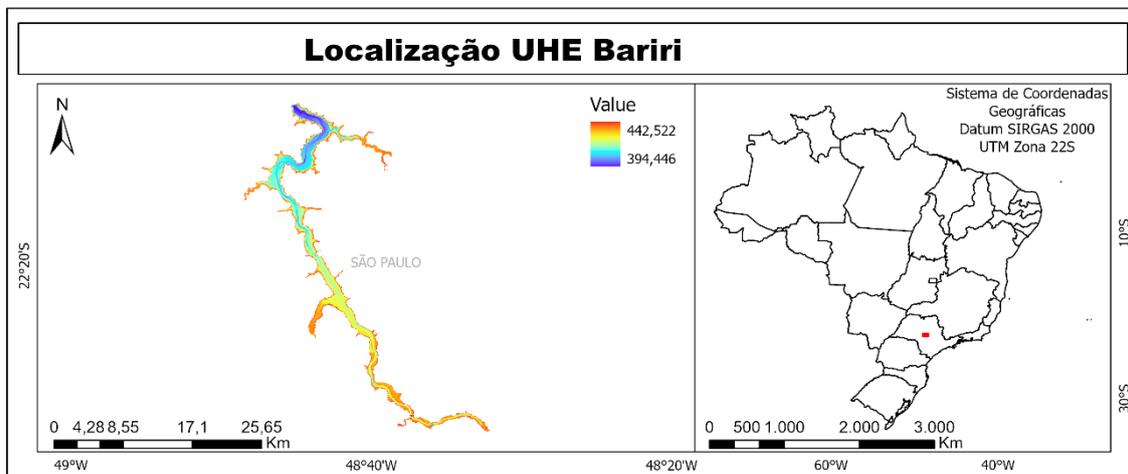


Quadro 1 – Ficha técnica UHE Água Vermelha (Fonte: METADADOS ANA)

UHE ÁGUA VERMELHA	
Empresa	AES TIETÊ ENERGIA S.A.
Estado UHE (UF)	São Paulo (SP)
Municípios Margem Direita	ITURAMA
Municípios Margem Esquerda	OUROESTE
Bacia Hidrográfica	Grande
Rio	Rio Grande
Potência Instalada (MW)	1396,2
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	19S 52' 04,1550"/ 50W 20' 43,9736"
Área Inundada Atualizada (km ²)	650,72
Volume Útil Atualizado (hm ³)	5220,24
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	10656,84
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	10656,84
N.A Montante (Sistema Local) (m)	383,3 (Max.Maximorum)
	383,3 (Max. Normal)
	373,3 (Min. Normal)

UHE Bariri

Figura 12 – Mapa de localização UHE Bariri (Fonte: elaboração própria)

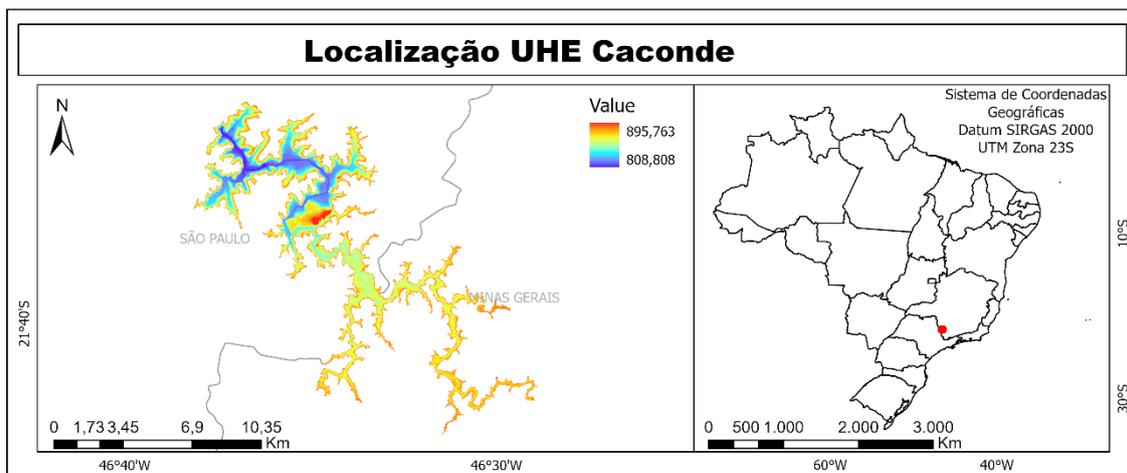


Quadro 2 – Ficha técnica UHE Bariri (Fonte: METADADOS ANA)

UHE BARIRI	
Empresa	AES TIETÊ ENERGIA S.A.
Estado UHE (UF)	São Paulo (SP)
Municípios Margem Direita	Bariri
Municípios Margem Esquerda	Boracéia
Bacia Hidrográfica	Tietê
Rio	Tietê
Potência Instalada (MW)	136,8
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	22S 09' 11,8161" / 48W 45' 08,6906"
Área Inundada Atualizada (km ²)	53,188
Volume Útil Atualizado (hm ³)	48,671
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	484,349
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	542,227
N.A Montante (Sistema Local) (m)	428,5 (Max. Maximorum)
	427,5 (Max. Normal)
	426,5 (Min. Normal)

UHE Caconde

Figura 13 – Mapa de localização UHE Caconde (Fonte: elaboração própria)

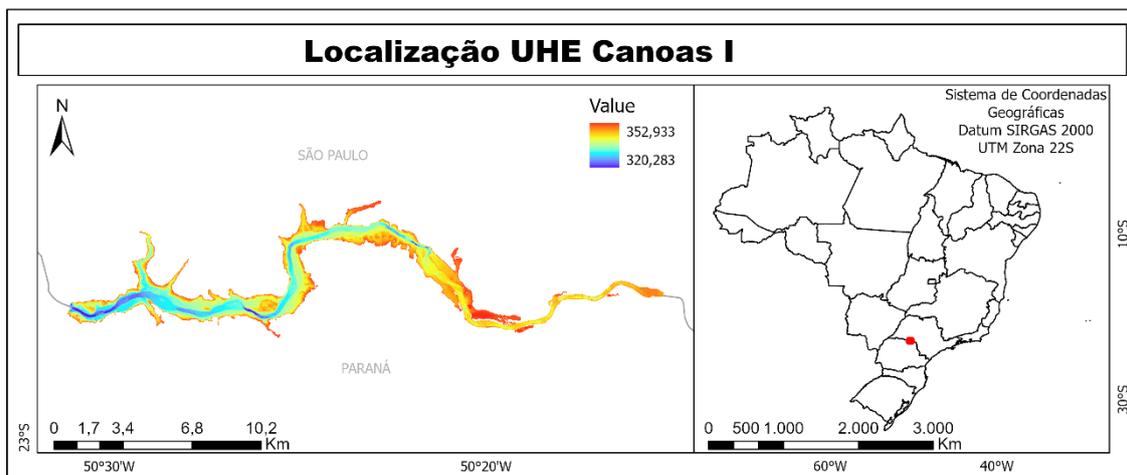


Quadro 3 – Ficha técnica UHE Caconde (Fonte: METADADOS ANA)

UHE CACONDE	
Empresa	AES TIETÊ ENERGIA S.A.
Estado UHE (UF)	São Paulo (SP)
Municípios Margem Direita	Caconde
Municípios Margem Esquerda	Caconde
Bacia Hidrográfica	Grande
Rio	Pardo
Potência Instalada (MW)	80,4
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	21S 34' 36,0528" / 46W 37' 27,0233"
Área Inundada Atualizada (km ²)	31,911
Volume Útil Atualizado (hm ³)	505,301
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	556,017
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	639,149
N.A Montante (Sistema Local) (m)	857,5 (Max. Maximorum)
	855,0 (Max. Normal)
	825,0 (Min. Normal)

UHE Canoas I

Figura 14 – Mapa de localização UHE Canoas I (Fonte: elaboração própria)

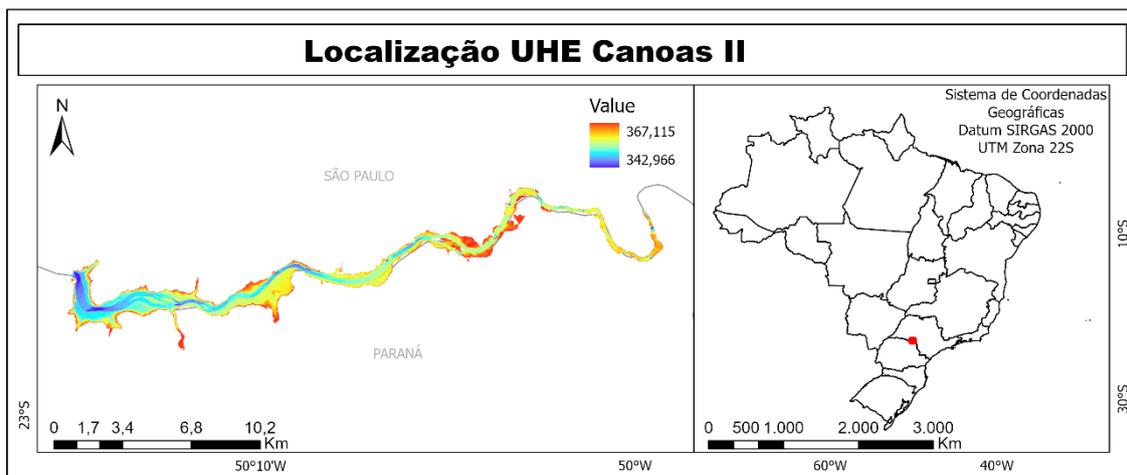


Quadro 4 – Ficha técnica UHE Canoas I (Fonte: METADADOS ANA)

UHE CANOAS I	
Empresa	Rio Paranapanema Energia
Estado UHE (UF)	São Paulo (SP) / Paraná (PR)
Municípios Margem Direita	Cândido Mota (SP)
Municípios Margem Esquerda	Itambaracá (PR)
Bacia Hidrográfica	Paranapanema
Rio	Paranapanema
Potência Instalada (MW)	82,50 MW
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	Latitude: S 22:56:25 / Longitude: W 50:31:00
Área Inundada Atualizada (km ²)	27,332
Volume Útil Atualizado (hm ³)	25,968
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	223,272
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	231,498
N.A Montante (Sistema Local) (m)	351,30 m(Max. Maximorum)
	351,00 m (Max. Normal)
	350,00 m(Min. Normal)

UHE Canoas II

Figura 15 – Mapa de localização UHE Canoas II (Fonte: elaboração própria)

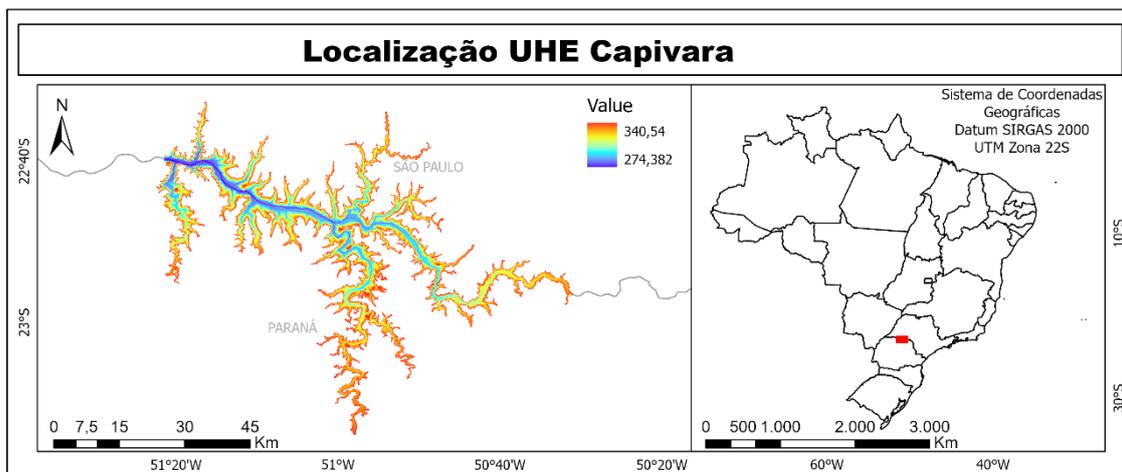


Quadro 5 – Ficha técnica UHE Canoas II (Fonte: METADADOS ANA)

UHE CANOAS II	
Empresa	Rio Paranapanema Energia
Estado UHE (UF)	São Paulo (SP) / Paraná (PR)
Municípios Margem Direita	Palmital (SP)
Municípios Margem Esquerda	Andirá (PR)
Bacia Hidrográfica	Paranapanema
Rio	Paranapanema
Potência Instalada (MW)	72,00 MW
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	Latitude: S 22:56:17 / Longitude: W 50:15:02
Área Inundada Atualizada (km ²)	21,347
Volume Útil Atualizado (hm ³)	20,285
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	159,002
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	165,613
N.A Montante (Sistema Local) (m)	366,30 m (Max. Maximorum)
	366,00 m (Max. Normal)
	365,00 m (Min. Normal)

UHE Capivara

Figura 16 – Mapa de localização UHE Capivara (Fonte: elaboração própria)

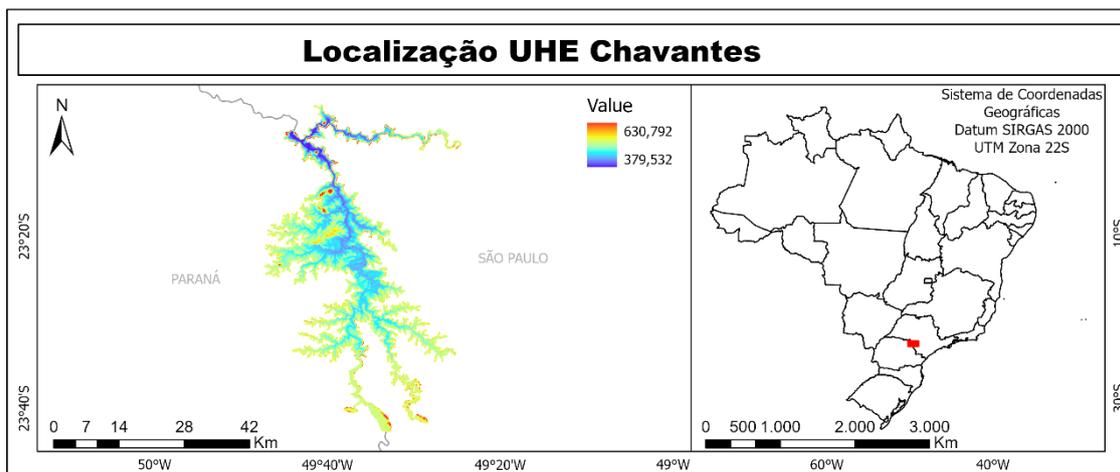


Quadro 6 – Ficha técnica UHE Capivara (Fonte: METADADOS ANA)

UHE CAPIVARA	
Empresa	Rio Paranapanema Energia
Estado UHE (UF)	São Paulo (SP) / Paraná (PR)
Municípios Margem Direita	Taciba (SP)
Municípios Margem Esquerda	Porecatu (PR)
Bacia Hidrográfica	Paranapanema
Rio	Paranapanema
Potência Instalada (MW)	619 MW
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	Latitude: S 22:39:33 / Longitude: W 51:21:33
Área Inundada Atualizada (km ²)	633,38
Volume Útil Atualizado (hm ³)	6.285,03
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	11.746,33
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	13.074,34
N.A Montante (Sistema Local) (m)	336,00 m(Max. Maximorum)
	334,00 m (Max. Normal)
	321,00 m(Min. Normal)

UHE Chavantes

Figura 17 – Mapa de localização UHE Chavantes (Fonte: elaboração própria)

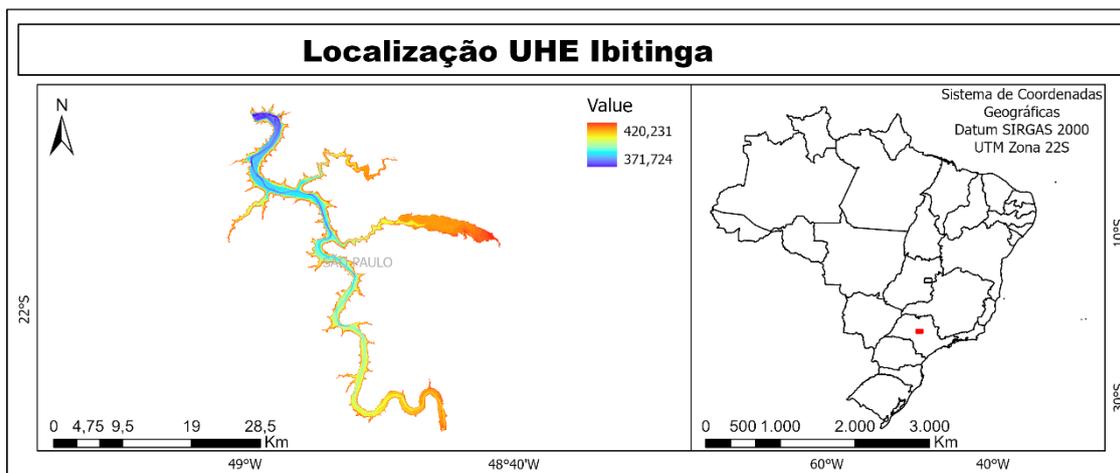


Quadro 7 – Ficha técnica UHE Chavantes (Fonte: METADADOS ANA)

UHE CHAVANTES	
Empresa	Rio Paranapanema Energia
Estado UHE (UF)	São Paulo (SP) / Paraná (PR)
Municípios Margem Direita	Chavantes (SP)
Municípios Margem Esquerda	Ribeirão Claro (PR)
Bacia Hidrográfica	Paranapanema
Rio	Paranapanema
Potência Instalada (MW)	414,00 MW
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	Latitude: S 23:07:34 / Longitude: W 49:43:51
Área Inundada Atualizada (km ²)	402,53
Volume Útil Atualizado (hm ³)	3.059,17
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	8.873,84
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	9.509,40
N.A Montante (Sistema Local) (m)	475,50 m(Max. Maximorum)
	474,00 m (Max. Normal)
	465,23 m(Min. Normal)

UHE Ibitinga

Figura 18 – Mapa de localização UHE Ibitinga (Fonte: elaboração própria)

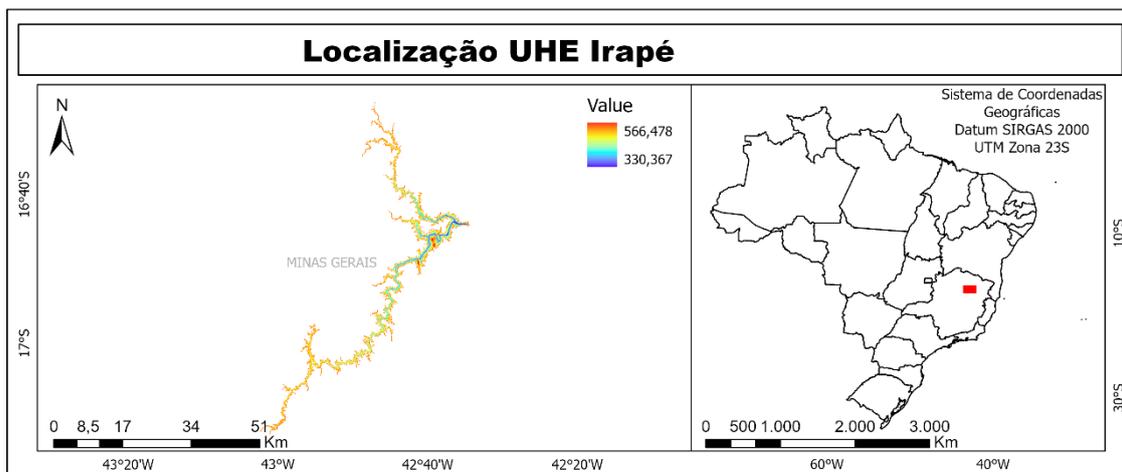


Quadro 8 – Ficha técnica UHE Ibitinga (Fonte: METADADOS ANA)

UHE IBITINGA	
Empresa	AES TIETÊ ENERGIA S.A.
Estado UHE (UF)	São Paulo (SP)
Municípios Margem Direita	IBITINGA
Municípios Margem Esquerda	IACANGA
Bacia Hidrográfica	Tietê
Rio	TIETÊ
Potência Instalada (MW)	131,49
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	21S 45' 33,8938" / 48W 59' 26,3574"
Área Inundada Atualizada (km ²)	100,418
Volume Útil Atualizado (hm ³)	47,695
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	927,864
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	1036,215
N.A Montante (Sistema Local) (m)	405,00 (Max. Maximorum)
	404,00 (Max. Normal)
	403,50 (Min. Normal)

UHE Irapé

Figura 19 – Mapa de localização UHE Irapé (Fonte: elaboração própria)

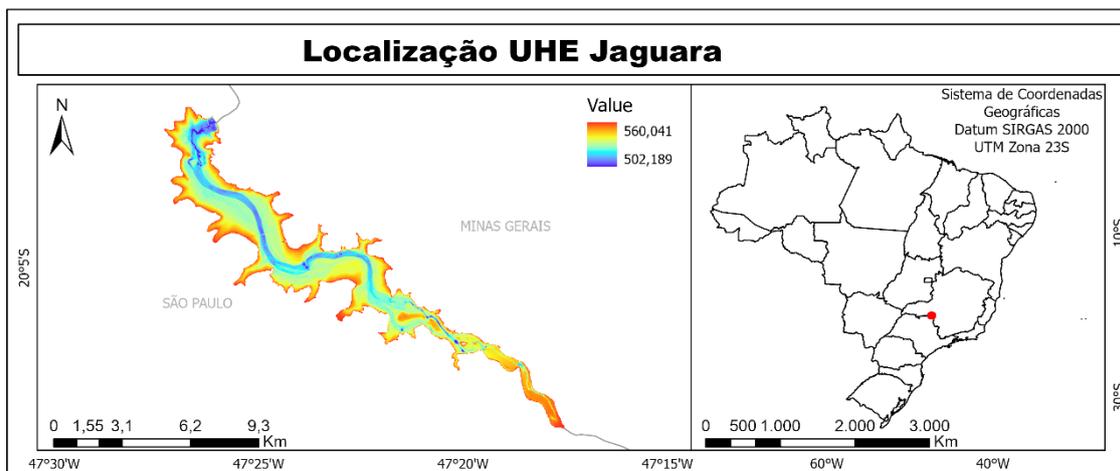


Quadro 9 – Ficha técnica UHE Irapé (Fonte: METADADOS ANA)

UHE IRAPÉ	
Empresa	Cemig Geração e Transmissão S.A.
Estado UHE (UF)	Minas Gerais (MG)
Municípios Margem Direita	Berilo – MG
Municípios Margem Esquerda	Grão Mogol – MG
Bacia Hidrográfica	Atlântico Trecho Leste
Rio	Jequitinhonha
Potência Instalada (MW)	360,00
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	16°44'09"S / 42°34'23"W
Área Inundada Atualizada (km ²)	137,449
Volume Útil Atualizado (hm ³)	3.676,741
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	5.859,886
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	6.168,855
N.A Montante (Sistema Local) (m)	512,20 (Max. Maximorum)
	510,00 (Max. Normal)
	470,80 (Min. Normal)

UHE Jaguará

Figura 20 – Mapa de localização UHE Jaguará (Fonte: elaboração própria)

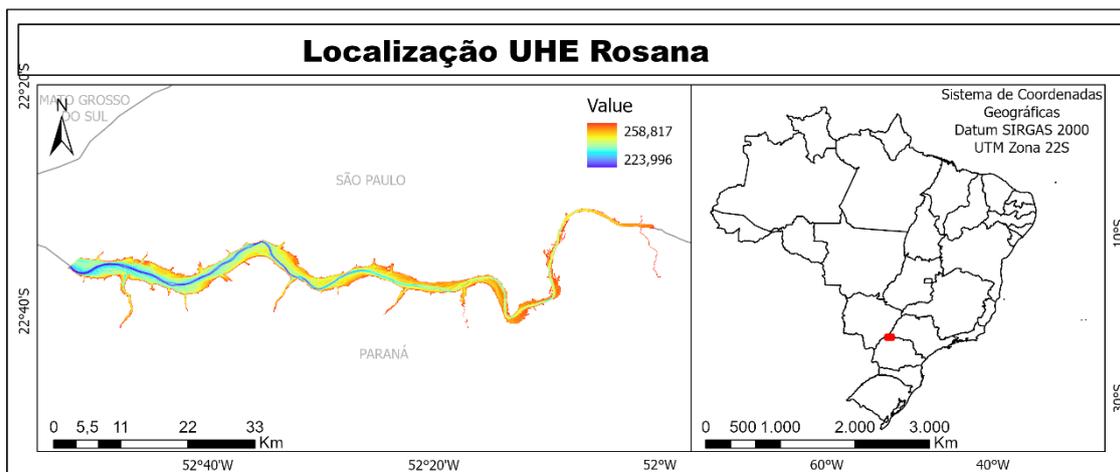


Quadro 10 – Ficha técnica UHE Jaguará (Fonte: METADADOS ANA)

UHE JAGUARA	
Empresa	Companhia Energética Jaguará
Estado UHE (UF)	São Paulo (SP) / Minas Gerais (MG)
Municípios Margem Direita	Sacramento (MG)
Municípios Margem Esquerda	Rifaina (SP) – Pedregulho (SP)
Bacia Hidrográfica	Grande
Rio	Grande
Potência Instalada (MW)	424
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	20°1'25.73"S, 47°26'1.41"W
Área Inundada Atualizada (km ²)	33,700
Volume Útil Atualizado (hm ³)	96,766
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	494,324
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	514,088
N.A Montante (Sistema Local) (m)	559,08 (Max. Maximorum)
	558,50 (Max. Normal)
	555,50 (Min. Normal)

UHE Rosana

Figura 21 – Mapa de localização UHE Rosana (Fonte: elaboração própria)



Quadro 11 – Ficha técnica UHE Rosana (Fonte: METADADOS ANA)

UHE ROSANA	
Empresa	Rio Paranapanema Energia
Estado UHE (UF)	São Paulo (SP) / Paraná (PR)
Municípios Margem Direita	Rosana (SP)
Municípios Margem Esquerda	Diamante do Norte (PR)
Bacia Hidrográfica	Paranapanema
Rio	Paranapanema
Potência Instalada (MW)	354 MW
Latitude / Longitude do Barramento (Coordenada Geográfica)	Latitude: S 22:36:05 / Longitude: W 52:52:18
Área Inundada Atualizada (km ²)	205,63
Volume Útil Atualizado (hm ³)	399,58
Volume Máximo Normal Atualizado (Hm ³)	1996,24
Volume Máximo Maximorum Atualizado (Hm ³)	2016,85
N.A Montante (Sistema Local) (m)	258,10 m(Max. Maximorum)
	258,00 m (Max. Normal)
	256,00 m(Min. Normal)

3.2. EQUIPAMENTOS e AQUISIÇÃO DE DADOS

As campanhas de medição foram realizadas entre os anos de 2014 e 2016 pela empresa contratada por cada UHE, visando atender a Resolução Conjunta da Agência Nacional de Águas (ANA) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 127, de 14 de dezembro de 2022. Os Relatórios Técnicos e os dados de campo dos empreendimentos já foram analisados e aprovados pela ANA e seus dados estão publicados no banco de Metadados da ANA.

A Quadro 12 – apresenta o modelo do ecobatímetro utilizado no levantamento da área molhada, a metodologia de aquisição da área seca e o período de aquisições da área molhada. Destaca-se que para o Reservatório da UHE Jaguará foi utilizado ecobatímetro monofeixe nas áreas rasas, porém as porcentagens de utilização de tal equipamento quando comparado ao multifeixe é mínima.

Quadro 12 – Relação de equipamentos utilizados

Usina	Modelo do Ecobatímetro Multifeixe	Área Seca	Período de aquisição
UHE Água Vermelha	<i>SeaBat 7101</i> <i>SeaBat 7125</i> <i>Odom MB2</i>	<i>LIDAR</i>	<i>14/01 a 06/02/2016</i> <i>17 a 28/04/2016</i>
UHE Bariri	<i>Odom MB1</i> <i>SeaBat T50P</i>	<i>LIDAR</i>	<i>05 a 08/05/2016</i> <i>17 a 28/05/2016</i>
UHE Caconde	<i>Odom MB2</i>	<i>LIDAR</i>	<i>12 e 13/03/2016</i> <i>22 a 24/05/2016</i>
UHE Canoas I	<i>Odom MB1</i>	<i>Imagens</i> <i>Ortorretificadas</i>	<i>16 a 26/11/2014</i>
UHE Canoas II	<i>Odom MB1</i>	<i>Imagens</i> <i>Ortorretificadas</i>	<i>28/10 a 10/1/2014</i>
UHE Capivara	<i>Odom MB1</i>	<i>LIDAR</i>	<i>08/09 a 21/10/2015</i>

	<i>SeaBat 7101</i>		
UHE Chavantes	<i>Odom MB2</i> <i>SeaBat 7125</i>	<i>LIDAR</i>	<i>01/10 a 01/12/2015</i> <i>01 a 28/02/2016</i>
UHE Ibitinga	<i>Odom MB1</i> <i>Odom MB2</i> <i>SeaBat T50P</i>	<i>LIDAR</i>	<i>28/04 a 15/05/2016</i>
UHE Irapé	<i>SeaBat T50P</i>	<i>LIDAR</i>	<i>16 a 23/03/2016</i>
UHE Jaguará	<i>SeaBat T50P</i> <i>Odom MB2</i> <i>Odom CV100</i>	<i>Aerofotogrametria</i>	<i>29/02 a 07/03/2016</i>
UHE Rosana	<i>Odom MB1</i>	<i>Imagens</i> <i>Ortorretificadas</i>	<i>17/12/2014 a</i> <i>04/02/2015</i>

3.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados brutos adquiridos foi realizado pela empresa Rural Tech, neste trabalho utilizaremos os pontos batimétricos já editados e processados. O procedimento realizado pela empresa foi descrito nos Relatórios Técnicos de cada Usina, onde consta como foram realizados o controle de qualidade e as correções estáticas, como inserção do nível monitorado para a redução à cota ortométrica. Os softwares utilizados no processamento dos dados foram o *PDS2000* e *QINSy*.

3.4. SIMULAÇÃO DE LINHAS MONOFEIXE

Um dos objetivos desse trabalho é verificar a influência da densidade de pontos de medição na estimativa do volume do reservatório. Como os dados batimétricos dos reservatórios foram adquiridos com ecobatímetro multifeixe, que adquire em forma de varredura integral do fundo do reservatório e elevada densidade de pontos de medição, foram simuladas aquisições com ecobatímetro monofeixe extraíndo seções transversais ao eixo do reservatório com espaçamento variável. A extração dos dados ocorreu em um *software* de

GIS, utilizando a ferramenta *Create Fishnet*. Essa ferramenta de geoprocessamento cria uma malha de pontos a partir de um MDT de entrada.

3.5. INTERPOLAÇÃO DOS DADOS

Após a geração das linhas monofeixe foi executada a interpolação dos pontos utilizando os seguintes interpoladores:

- *Inverse Distance Weighting* (IDW);
- *Radial Basis Function* (RBF);
- *Topo to Raster*;
- *Universal Kriging* (UK);
- *Global Polynomial Interpolation*.

Tais procedimentos foram elaborados em um *software* de GIS, o qual possui todas as ferramentas de interpoladores. Devido ao tamanho dos reservatórios e buscando manter uma padronização entre todos os produtos gerados o tamanho do pixel escolhido foi de 3 metros.

3.6. CÁLCULO DO VOLUME

A terceira etapa do estudo foi o cálculo do volume. Utilizando a ferramenta *Surface Volume*, *software GIS*, foram extraídos os valores de volume para todos os modelos gerados de cada reservatório. A cota escolhida para este trabalho foi o nível de água Mínimo Normal de cada empreendimento, visto que o objetivo desse trabalho foi a análise das áreas molhadas do reservatório. Tal informações foi retirada dos dados disponibilizados pela ANA.

3.7. CLASSIFICAÇÃO ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

A classificação estatística permite analisar e correlacionar os dados obtidos no estudo. Foram selecionadas duas metodologias: análise de clusters e componentes principais.

Segundo Davis (2002), a análise de cluster é uma técnica de classificação de dados que permite a separação das informações em grupos onde ocorre a identificação de padrões e similaridades entre eles. São atribuídos testes com objetivo de identificar os grupos mais homogêneos e os mais distintos entre si. Portanto, a finalidade desta análise é reunir observações em um grupo homogêneo, em que os membros do grupo ao mesmo tempo sejam similares entre si e distintos dos outros grupos. O autor complementa que o método de agrupamento de dados mais difundido é o agrupamento

hierárquico. A metodologia é baseada no sistema de matriz, iniciando com $n \times n$, testando os dados mais compatíveis, até chegar em 2×2 , os mais semelhantes entre si (DAVIS, 2002).

Os componentes principais têm como princípio autovetores de uma matriz de variância-covariância ou de uma matriz de correlação. É importante que todos os parâmetros estejam na mesma unidade para que todas possuam o mesmo peso. Por exemplo, caso tenha uma variável em centímetro e outra em metro, a comparação entre as duas variáveis será enviesada pela diferente unidade de medição. O objetivo desse processo é a redução da dimensionalidade de um conjunto de dados composto por mais de duas variáveis para um sistema de coordenadas cartesianas (DAVIS, 2002).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CÁLCULO DOS MDTs

Os modelos foram gerados em um *software* de GIS, a partir deles foi possível extrair diversas informações importantes sobre cada reservatório e suas características. Cada interpolador possui parâmetros específicos. A ferramenta IDW, caracterizada por ser um interpolador exato, determinístico e local, calcula o valor da célula usando a ponderação da distância inversa, limitado ao intervalo estipulado e a significância de cada ponto levando em consideração a distância do ponto principal. Neste processo foi selecionado o quadrado do inverso da distância ($1/D^2$), tal valor foi escolhido por ser aderente com outras análises como campo gravitacional. A qualidade do produto está diretamente relacionada com o número de amostragem. O processamento ocorre determinando o arquivo de pontos de entrada, o local e nome de saída e o tamanho da célula, adicionalmente indicamos como o expoente da distância como 2, o raio de pesquisa selecionado foi variável, isto é, selecionamos um número de pontos limitados aos 12 mais próximos ao ponto central.

A função *Radial Basis Function* é um interpolador com técnicas exatas, determinístico e local, isto é, a superfície deve passar por cada valor de amostra, a função matemática muda com a distância da amostra do ponto principal. Seu resultado é caracterizado por gerar superfícies lisas ou com variações suavizadas. O processamento ocorre determinando o arquivo de pontos de entrada, o local e nome de saída e o tamanho da célula, adicionalmente o raio de busca da vizinhança é definido com um máximo de 15 amostras e mínimo de 10 e o tipo de setor de busca é uma elipse única (1 setor).

O interpolador *Topo to Raster* foi desenvolvido especificamente para a criação de modelos digitais de elevação hidrológicamente corrigidos. Este método utiliza uma técnica iterativa de interpolação por diferenças finitas, considerada uma junção do método de interpolação local, como IDW, e o método de interpolação global, como o *Kriging*. Diferente dos demais o modelo irá ser ajustado para que acompanhe as mudanças abruptas no terreno. O processamento ocorre determinando o arquivo de pontos de entrada e o seu tipo de dado, neste caso selecionado ponto, o local e nome de saída, o tamanho

da célula, e adicionalmente foi determinado a importância da rede de drenagem, sendo assim o software irá valorizar os padrões de drenagem, foi informado que o tipo de dado inserido é pontual, com número máximo de iterações como 20.

Os interpoladores tipo *Kriging* utilizam um modelo estatístico que inclui probabilidade, o que o difere dos demais métodos determinísticos. Para chegar ao resultado ocorrem várias etapas, a análise estatística exploratória dos dados, modelagem de variograma, criação da superfície e exploração de uma superfície de variância. A superfície estimada é gerada a partir de um conjunto disperso de pontos com valores Z. Comparando com o método IDW, o peso do ponto depende unicamente da distância até o local da predição, já no método da krigagem o peso é baseado na distância e na disposição espacial dos pontos. A metodologia universal pressupõe que há uma tendência predominante nos dados, podendo ser modelada por uma função determinística, um polinômio, o qual é subtraído dos pontos medidos originais e a autocorrelação é modelada a partir dos erros aleatórios.

O interpolador *Global Polynomial Interpolation* ajusta a superfície utilizando um polinômio como função matemática, portanto o resultado obtido não é fidedigno ao valor exato observado, caracterizando-o como um interpolador não exato, diferente dos métodos estudados acima. A característica dessa metodologia é a possibilidade da escolha da ordem do polinômio, sendo linear a superfície não apresentará dobras, sendo quadrático será possível uma curva, cúbico três curvas, e assim por diante.

4.2. CÁLCULO DOS ÍNDICES

Conforme apresentado no item sobre a complexidade do terreno, foram calculados os parâmetros para todos os reservatórios em análise e extraídos os valores de mínimo, máximo, média e desvio padrão, respectivamente para cada empreendimento em um *software* de GIS (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores dos Índices de Complexidade do Terreno

UHE Água Vermelha				
Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	26,342	2,126	2,124
Curvatura Total	0,000	22,568	0,194	0,281
Diferença de Altura Local	0,000	10,293	0,763	0,742
Rugosidade	0,000	9,832	0,767	0,730

UHE Bariri				
Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	43,053	2,601	3,788
Curvatura Total	0,000	15,186	0,496	0,688
Diferença de Altura Local	0,000	10,734	0,474	0,674
Rugosidade	0,000	11,225	0,471	0,655

UHE Caconde				
Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	34,926	8,668	6,435
Curvatura Total	0,000	18,294	0,895	1,348
Diferença de Altura Local	0,000	11,675	2,323	1,788
Rugosidade	0,000	10,166	2,312	1,723

UHE Canoas I

Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	33,041	3,196	3,681
Curvatura Total	0,000	29,797	0,839	1,093
Diferença de Altura Local	0,000	8,927	0,746	0,822
Rugosidade	0,000	7,942	0,772	0,816

UHE Canoas II

Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	31,956	3,285	3,824
Curvatura Total	0,000	35,620	0,759	1,014
Diferença de Altura Local	0,000	8,343	0,762	0,858
Rugosidade	0,000	7,422	0,780	0,848

UHE Capivara

Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	33,362	3,272	2,659
Curvatura Total	0,000	15,048	0,209	0,276
Diferença de Altura Local	0,000	11,991	1,146	0,956
Rugosidade	0,000	12,755	1,135	0,916

UHE Chavantes

Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	60,423	6,721	5,937
Curvatura Total	0,000	39,948	0,663	0,992
Diferença de Altura Local	0,000	19,316	1,225	1,132
Rugosidade	0,000	16,163	1,195	1,081

UHE Ibitinga

Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	27,734	2,233	2,921
Curvatura Total	0,000	12,455	0,331	0,411
Diferença de Altura Local	0,000	10,980	0,807	1,013
Rugosidade	0,000	10,067	0,841	1,010

UHE Irapé

Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	64,076	20,637	10,508
Curvatura Total	0,000	39,873	2,223	2,573
Diferença de Altura Local	0,000	31,156	5,791	3,436
Rugosidade	0,000	29,189	5,707	3,08

UHE Jaguará				
Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	47,736	4,327	5,229
Curvatura Total	0,000	35,004	0,770	1,211
Diferença de Altura Local	0,000	15,157	1,024	1,247
Rugosidade	0,000	13,614	1,026	1,215

UHE Rosana				
Índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Desvio Padrão da Declividade	0,000	32,920	2,409	2,899
Curvatura Total	0,000	35,846	0,445	0,730
Diferença de Altura Local	0,000	7,317	0,439	0,524
Rugosidade	0,000	11,298	0,436	0,508

Visando visualizar a distribuição dos valores dos parâmetros analisados, foram gerados alguns produtos no *Excel*. A Figura 22 apresenta os valores médios obtidos para cada índice, referente a cada reservatório.

Nota-se que dentro dos valores dos índices a diferença de altura local e a rugosidade se correlacionam e apresentam valores muito próximos. O desvio padrão da declividade é sempre o dado com maior valor e a curvatura total varia entre estar correlacionada com os valores da diferença de altura local e rugosidade, e apresentar um valor inferior a eles.

Analisando de forma visual é possível perceber que há dois reservatórios se destacando dos demais, não seguindo o padrão dentre os resultados obtidos, sendo eles a UHE Caconde e UHE Irapé. A Figura 23 apresenta o

mesmo gráfico sem esses dois empreendimentos. Pode-se observar como os dados apresentam uma melhor homogeneidade.

Figura 22 – Gráfico dos Índices dos Reservatórios (Fonte: elaboração própria)

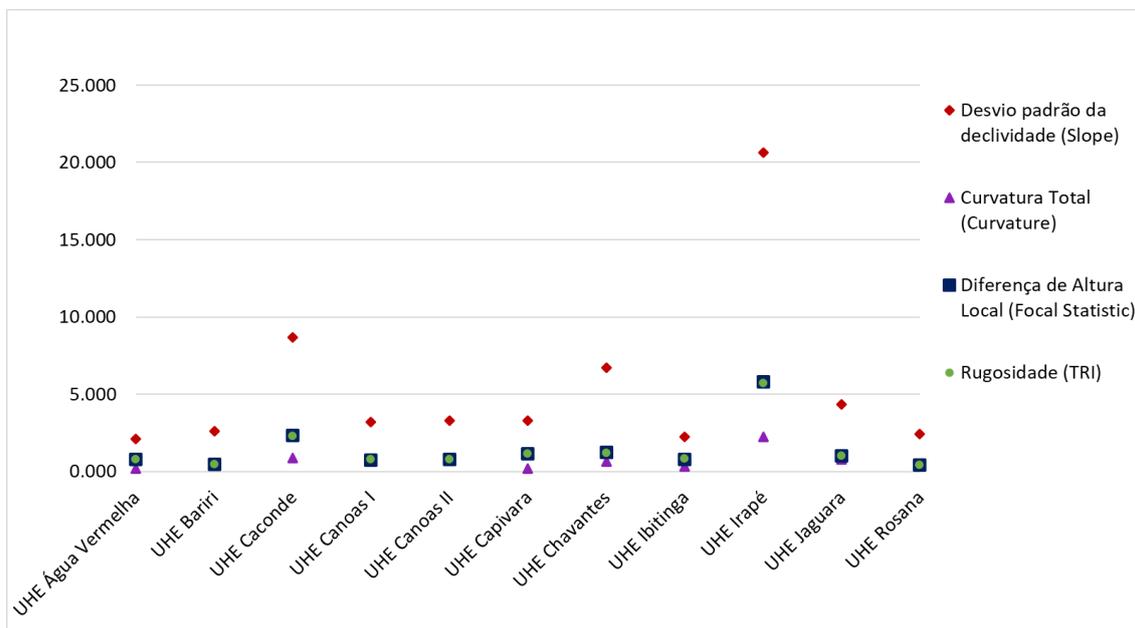
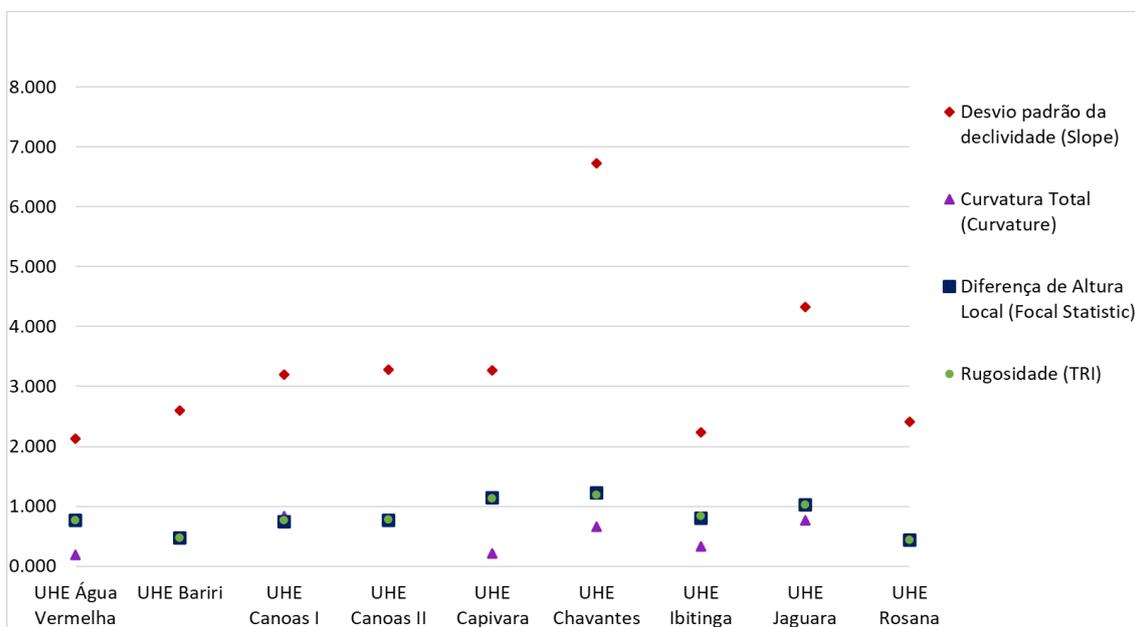


Figura 23 – Gráfico dos Índices dos Reservatórios sem as UHEs Caconde e Irapé (Fonte: elaboração própria)



Outra comparação interessante de se realizar é a visualização dos MDT, é possível observar que os dois reservatórios, UHE Caconde e Irapé, são caracterizados com uma área alaga extensa. Além disso, suas áreas alagadas

são mais rasas, concentrando os valores mais profundos somente na calha originária do rio.

Visando entender, analisar e correlacionar os dados apresentados até o momento, foi considerada a localização de cada reservatório, em qual bacia hidrográfica estão situados e qual rio foi represado. Uma possível informação em comum que pode servir de classificação. De acordo com as informações disponibilizadas nas Fichas Técnicas de cada Usina é possível observar que as 11 (onze) Usinas estão situadas em 4 (quatro) Bacias diferentes e 5 (cinco) rios, destacados na Quadro 13 – .

Quadro 13 – Localização de cada Usina de acordo com a Bacia e Rio

Usinas	Bacia	Rio
UHE Água Vermelha	Bacia do Grande	Rio Grande
UHE Caconde	Bacia do Grande	Rio Prado
UHE Jaguará	Bacia do Grande	Rio Grande
UHE Bariri	Bacia do Tietê	Rio Tietê
UHE Ibitinga	Bacia do Tietê	Rio Tietê
UHE Canoas I	Bacia do Paranapanema	Rio Paranapanema
UHE Canoas II	Bacia do Paranapanema	Rio Paranapanema
UHE Capivara	Bacia do Paranapanema	Rio Paranapanema
UHE Chavantes	Bacia do Paranapanema	Rio Paranapanema
UHE Rosana	Bacia do Paranapanema	Rio Paranapanema
UHE Irapé	Bacia Atlântico Trecho Leste	Rio Jequitinhonha

A próxima análise realizada foi a separação dos reservatórios por bacia, comparando os valores médios de cada índice. As Figura 24 a Figura 26 apresentam as 3 bacias em comum, como a UHE Irapé não está alocada em uma bacia com outro empreendimento não foi gerado seu gráfico.

Na Figura 24 é possível observar que a UHE Caconde se destaca das demais, uma diferença observada entre os três reservatórios é o seu Rio de origem, diferente das duas outras usinas.

Na Bacia do rio Tietê, as três UHEs apresentam comportamentos muito similares (Figura 25). Diferente da Bacia do Rio Paranapanema (Figura 26), visto que a UHE Chavantes está destoando levemente dos demais reservatórios da mesma bacia. Voltando nas imagens dos modelos apresentados nas áreas de estudos, é possível perceber que a UHE Chavantes possui uma área alagada grande, similar a UHE Caconde, o diferencial está nas profundidades, onde é possível observar que a usina em questão é mais profunda, não possuindo tantas áreas rasas como a usina da outra bacia.

Figura 24 – Gráfico dos Índices dos Reservatórios da Bacia do Grande (Fonte: elaboração própria)

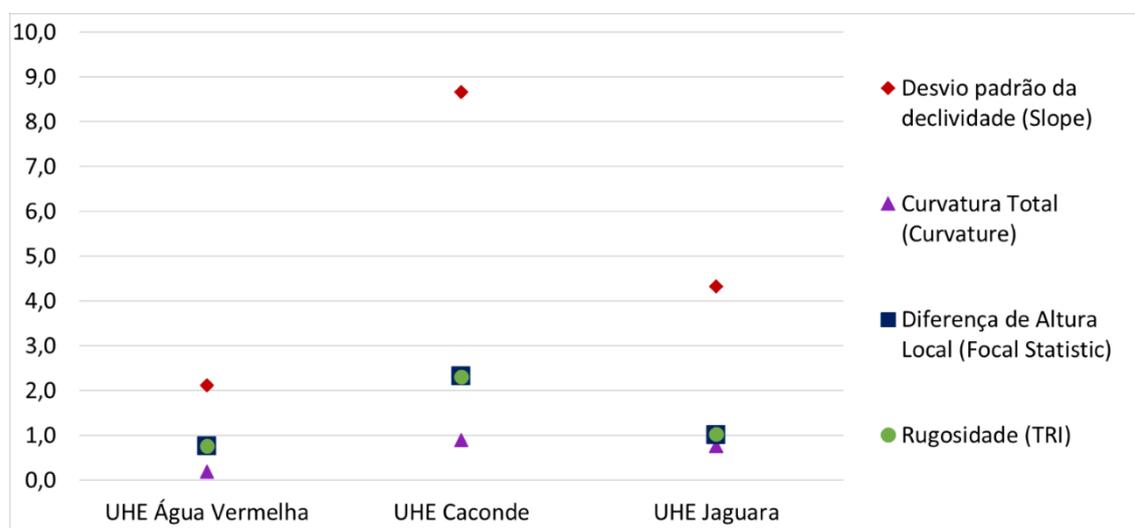


Figura 25 – Gráfico dos Índices dos Reservatórios da Bacia do Tietê (Fonte: elaboração própria)

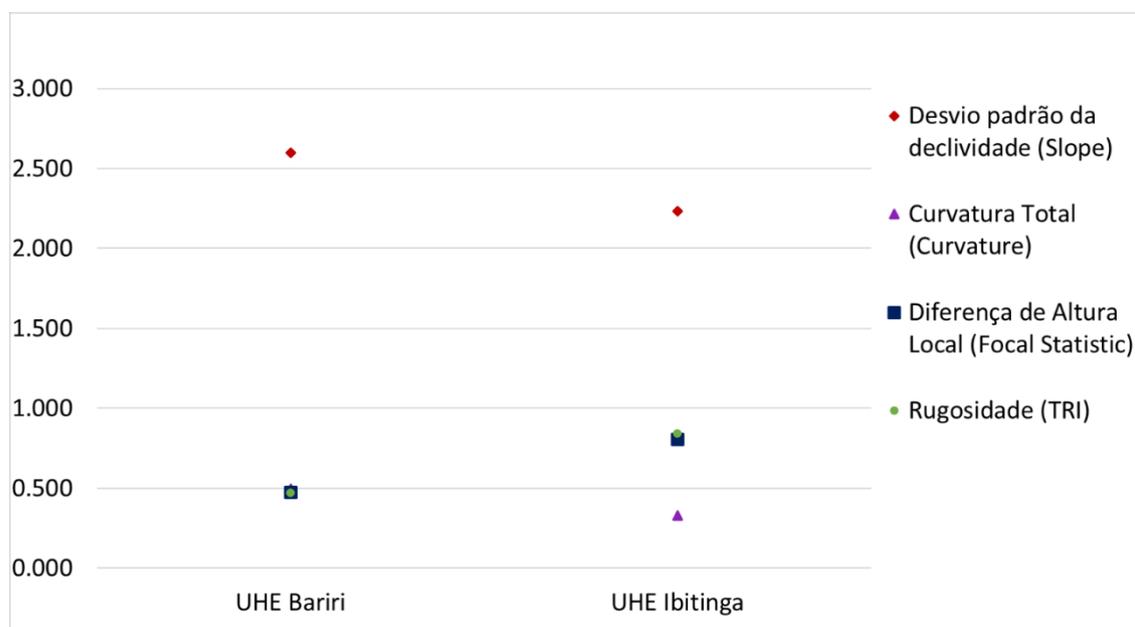
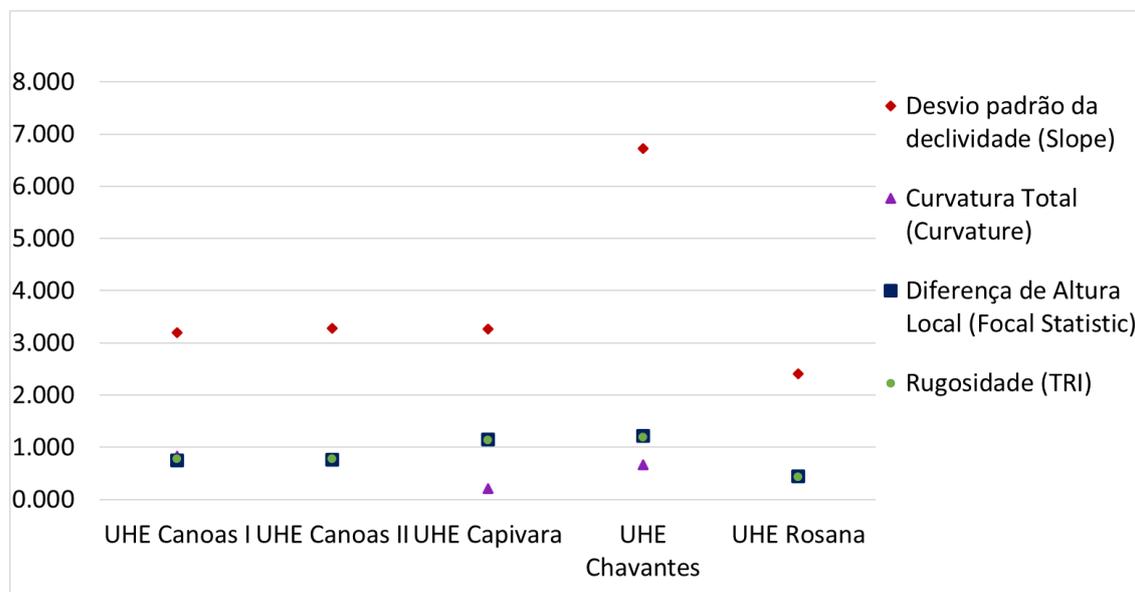


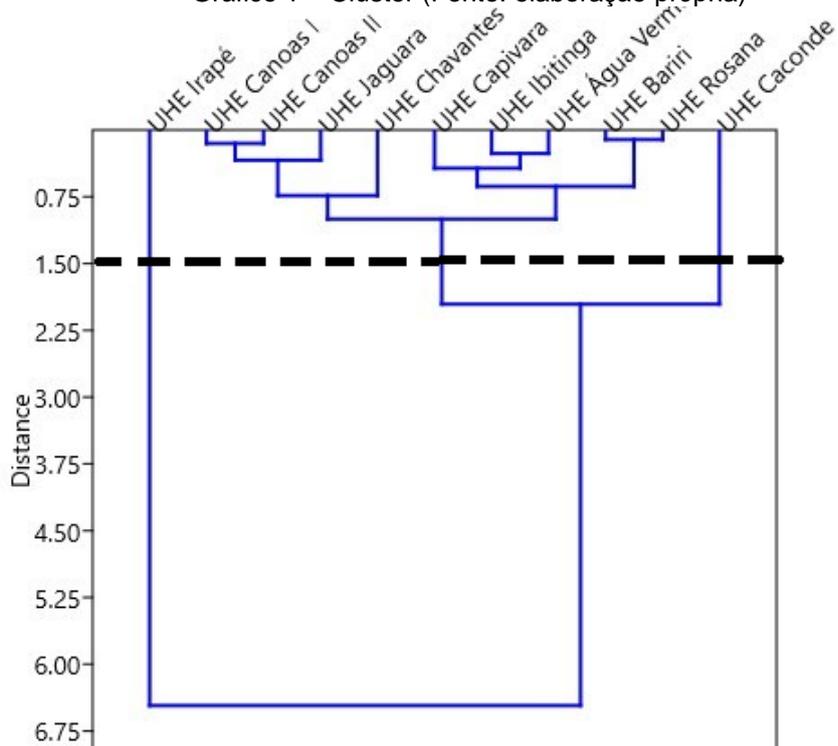
Figura 26 – Gráfico dos Índices dos Reservatórios da Bacia do Paranapanema (Fonte: elaboração própria)



4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

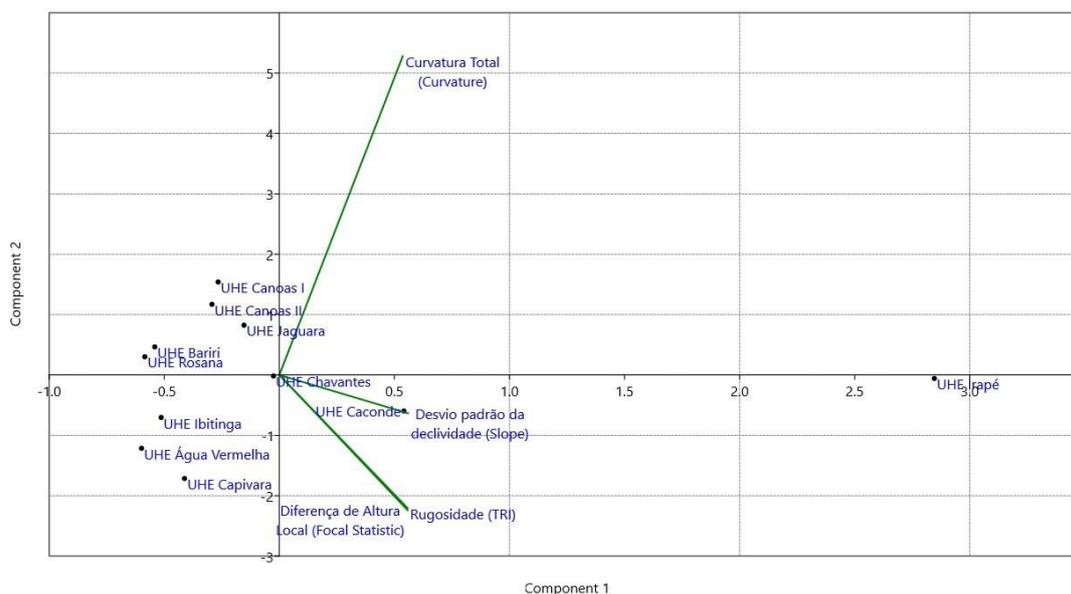
Adicionalmente foram realizadas duas análises estatísticas no *software Past*, *Classical Cluster* e de componentes principais. Ambos utilizaram como dado de entrada os índices de desvio padrão da curvatura, curvatura total, diferença de altura e rugosidade de cada reservatório (Gráfico 1 – Clustere Gráfico 2).

Gráfico 1 – Cluster (Fonte: elaboração própria)



O Gráfico 1 – Cluster mostra o agrupamento em forma de cluster dos reservatórios de acordo com a distância definida por uma métrica multivariada. Os resultados foram divididos em três clusters: UHE Irapé, UHE Caconde e o agrupamento com as demais usinas. Esta classificação está em concordância com os gráficos da análise dos índices, visto que as usinas alocadas sozinhas no cluster também estão com dados discrepante das demais.

Gráfico 2 – Componentes Principais (Fonte: elaboração própria)



O *software Past* calculou o autovalor e a porcentagem de variação dos índices da complexidade do terreno para gerar o gráfico das componentes principais (Gráfico 2). Dentre os quatro tópicos, o de maior peso foi o desvio padrão da declividade (1), seguido da curvatura total (2), diferença de altura local (3) e rugosidade (4), a Tabela 2 apresenta o quantitativo de cada item. O gráfico levou em consideração as duas componentes de maior peso, a componente 1 e a componente 2, sendo elas, respectivamente o desvio padrão da declividade e a curvatura total. Observa-se que duas usinas se destacam do lado positivo do eixo x, UHE Irapé e UHE Caconde, complementando o início das comparações.

Tabela 2 – Autovalor e porcentagem de variação dos índices da complexidade do terreno

PC	Eigenvalue	% variance
1	4.54339	96.472
2	0.149494	3.1743
3	0.0166102	0.35269
4	2.50783E-05	0.0005325

Pode-se observar que os gráficos são complementares entre si, isto é, no Gráfico 1 – Cluster os reservatórios agrupados seguem próximo uns dos outros no Gráfico 2Gráfico 2 – . O mesmo ocorre para a amostra mais distinta, a UHE Irapé, que não foi alocada junto com nenhuma outra usina.

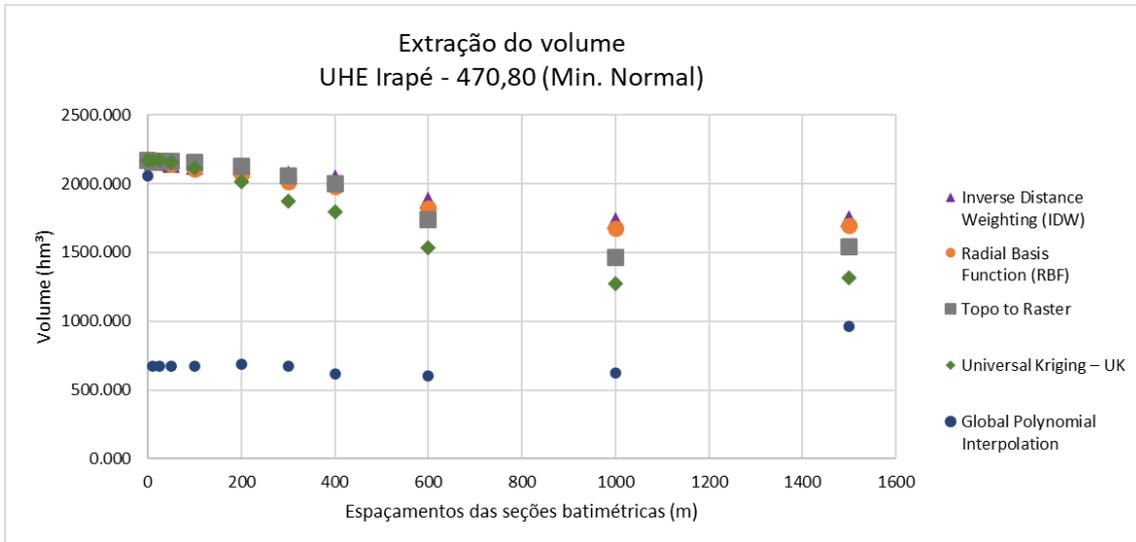
4.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS MONOFEIXE E MULTIFEIXE

A análise dos interpoladores ocorreu por meio da extração do dado de volume de cada modelo elaborado por reservatório. A ferramenta *Surface Volume* possui como função extrair o valor do volume a partir de uma cota selecionada até o fundo do reservatório. Este estudo tomou como cota o valor do N.A. Mínimo Normal de cada reservatório.

Após a geração dos dados foi observado que o interpolador Global Polynomial Interpolation apresentou valores de volume (hm³) muito destoantes dos demais interpoladores. Uma das diferenças observadas dele para os demais é que ele foi o único interpolador não exato. A Figura 27 apresenta os valores comparando os cinco interpoladores, observa-se que há uma variação de 1500 hm³ entre eles. Outro ponto a se analisar que ele segue uma tendência linear,

diferente das demais que é exponencial. Por fim da análise, o valor de volume para o multifeixe é mais próximo dos demais metodologias de interpolação.

Figura 27 – Resultados UHE Irapé com cinco interpoladores (Fonte: elaboração própria)



A seguir são apresentados os gráficos de cada reservatório com os dados calculados, retirando o interpolador Global. No eixo Y encontrasse os valores de volume em hm³ e no eixo X dos espaçamentos das linhas monofeixe, até chegar no zero, multifeixe. Os dados em formato tabular estão disponíveis nos Anexos. Adicionalmente foi colocada nos gráficos a regressão polinomial utilizando como base os dados do *Topo to Raster*.

Figura 28 – Resultados UHE Água Vermelha (Fonte: elaboração própria)

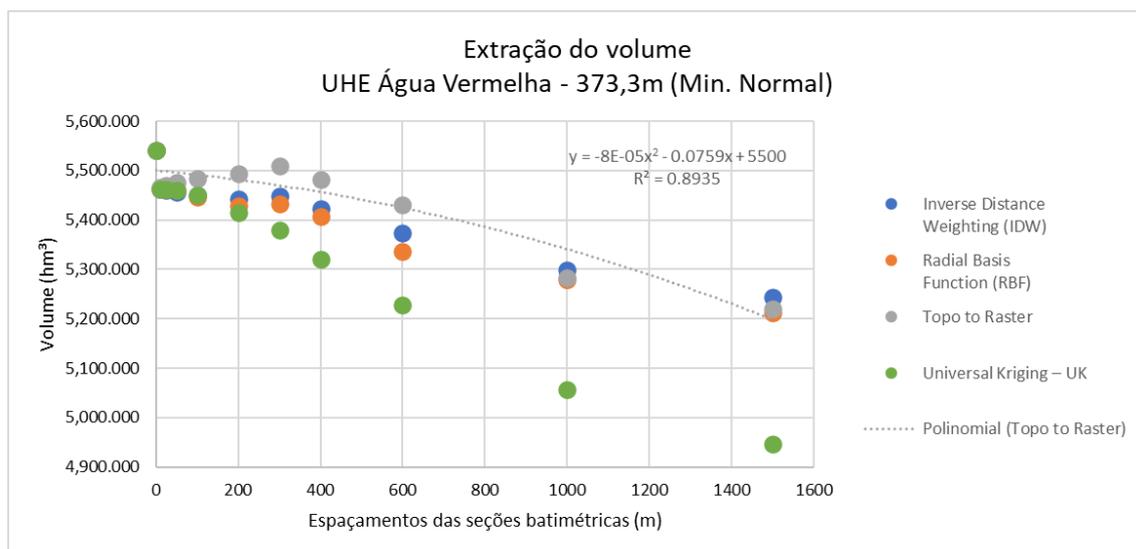


Figura 29 – Resultados UHE Bariri (Fonte: elaboração própria)

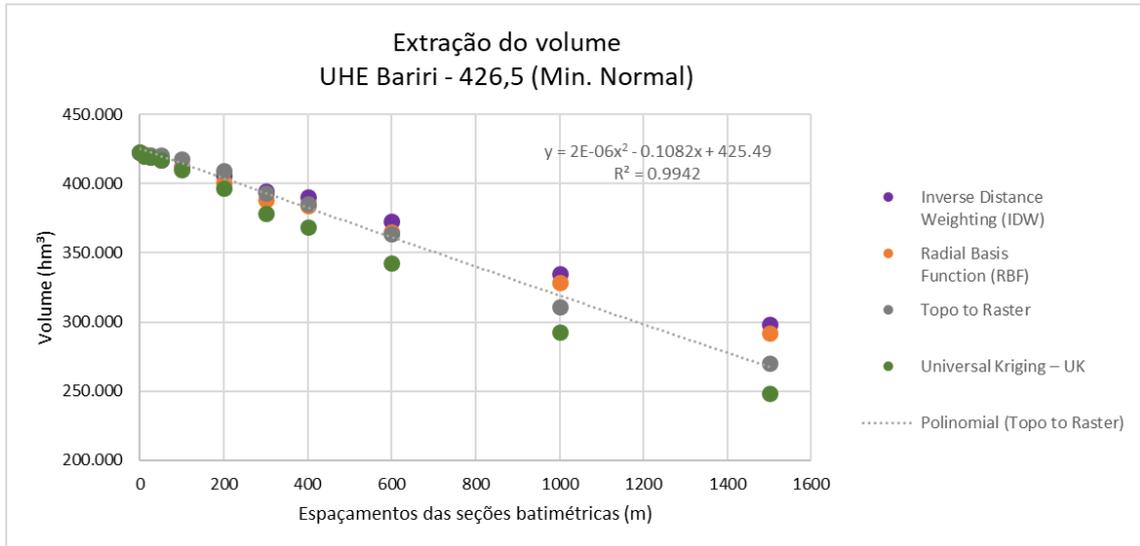


Figura 30 – Resultados UHE Caconde (Fonte: elaboração própria)

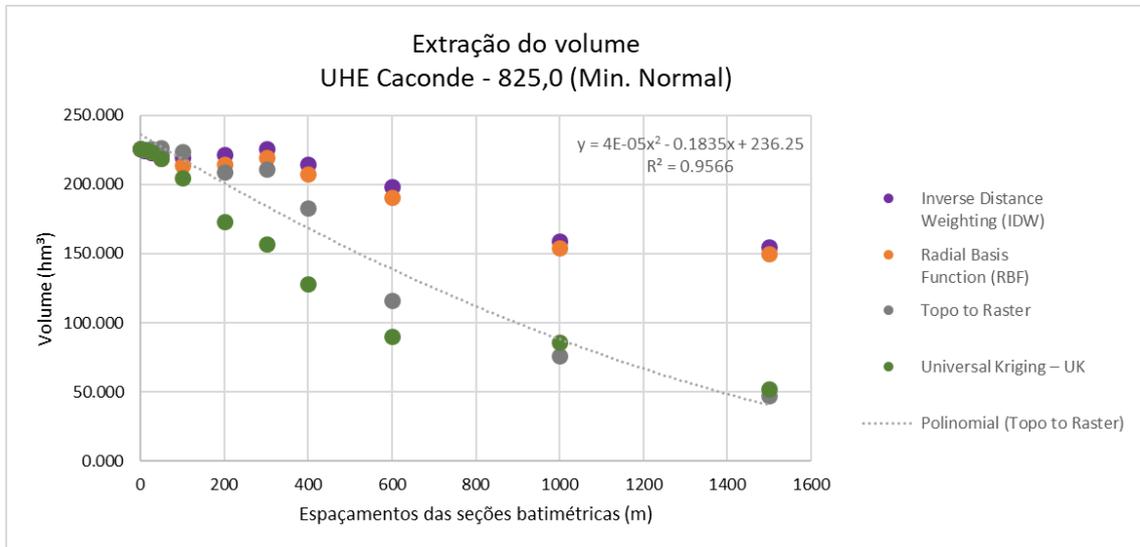


Figura 31 – Resultados UHE Canoas I (Fonte: elaboração própria)

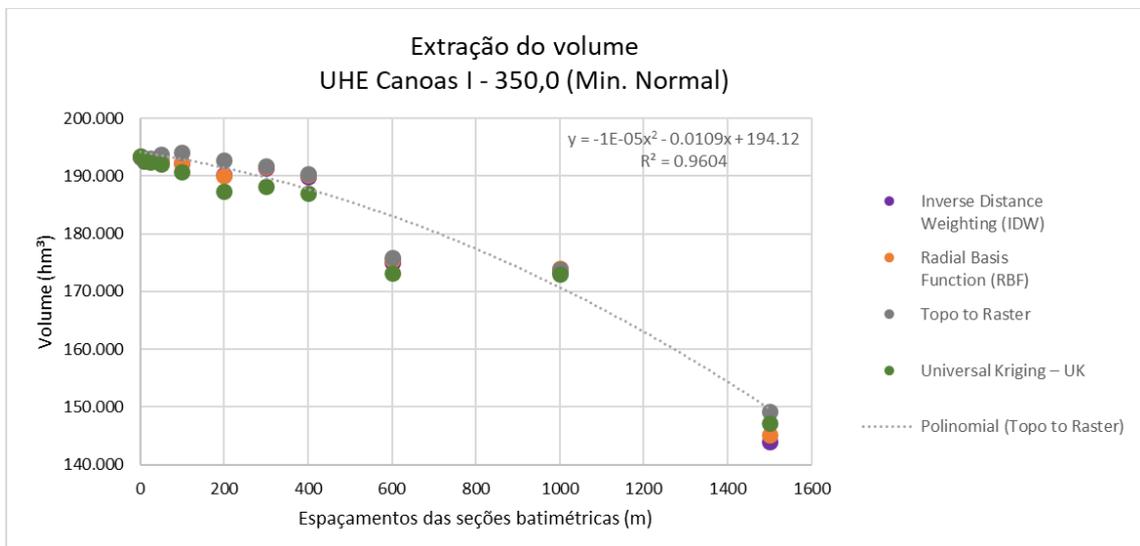


Figura 32 – Resultados UHE Canoas II (Fonte: elaboração própria)

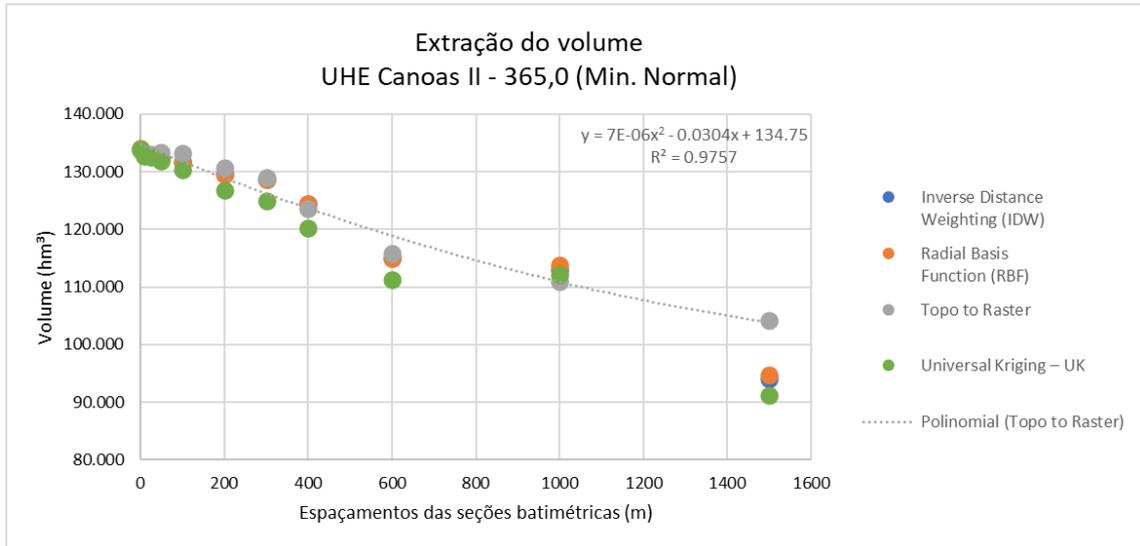


Figura 33 – Resultados UHE Capivara (Fonte: elaboração própria)

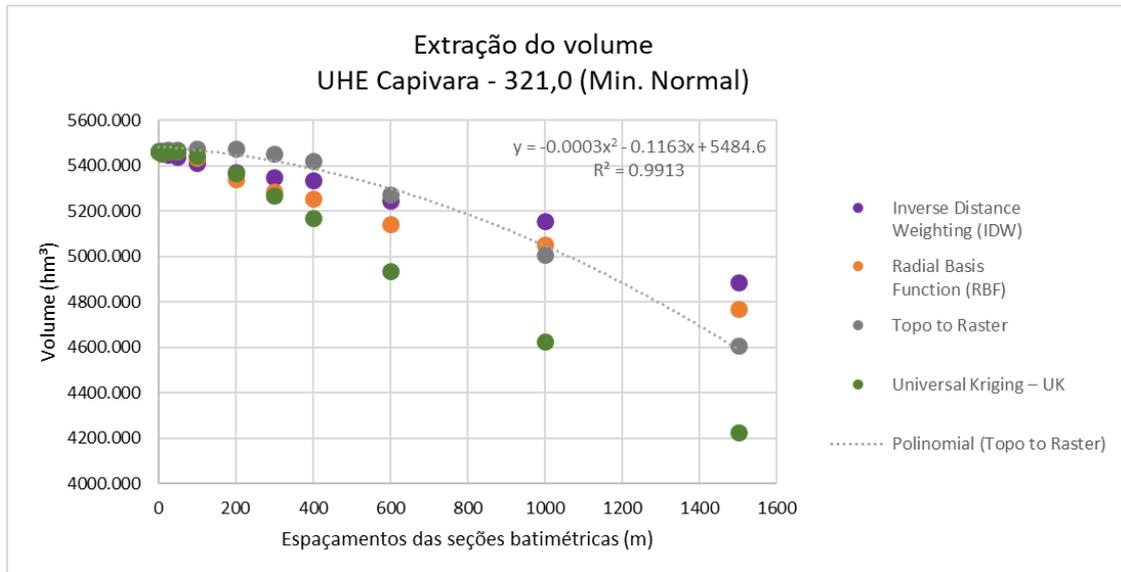


Figura 34 – Resultados UHE Chavantes (Fonte: elaboração própria)

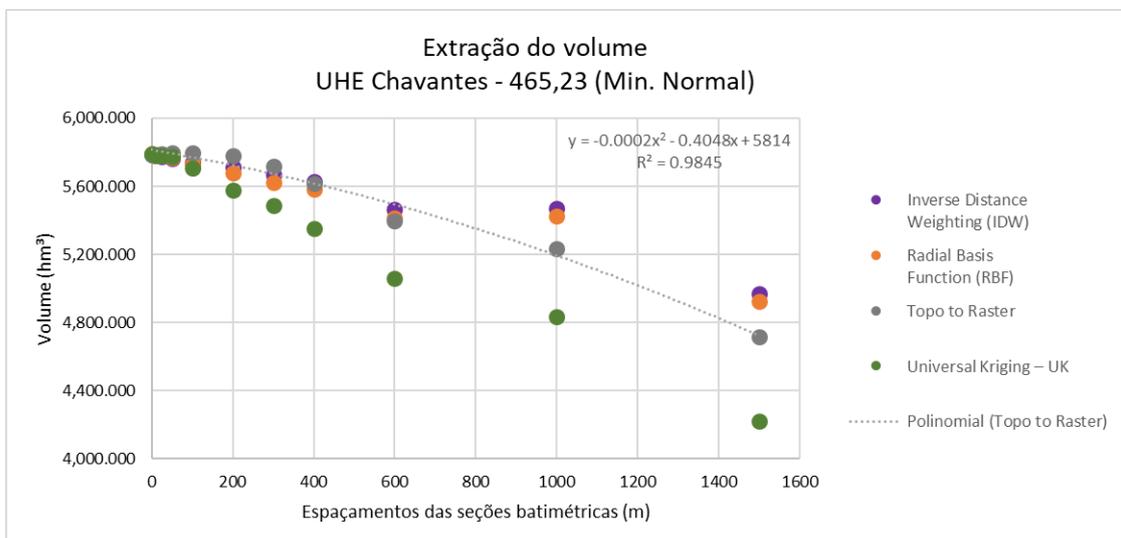


Figura 35 – Resultados UHE Ibitinga (Fonte: elaboração própria)

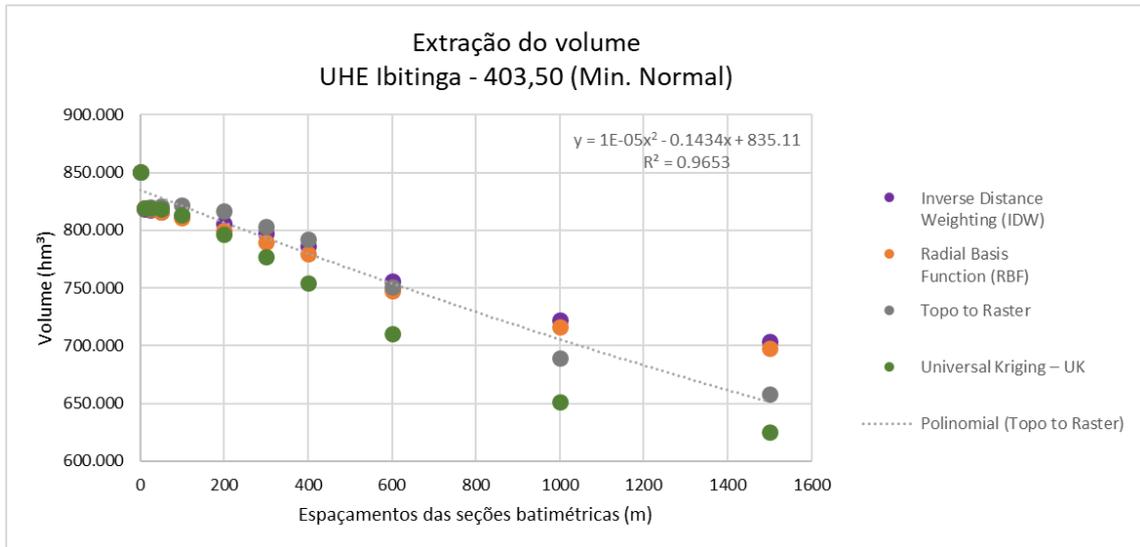


Figura 36 – Resultados UHE Irapé (Fonte: elaboração própria)

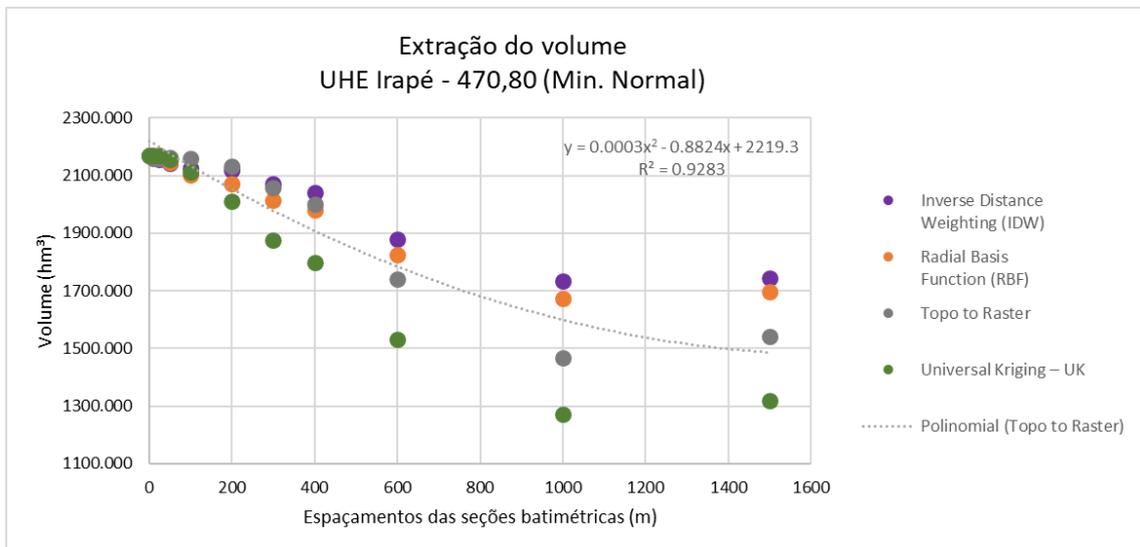


Figura 37 – Resultados UHE Jaguará (Fonte: elaboração própria)

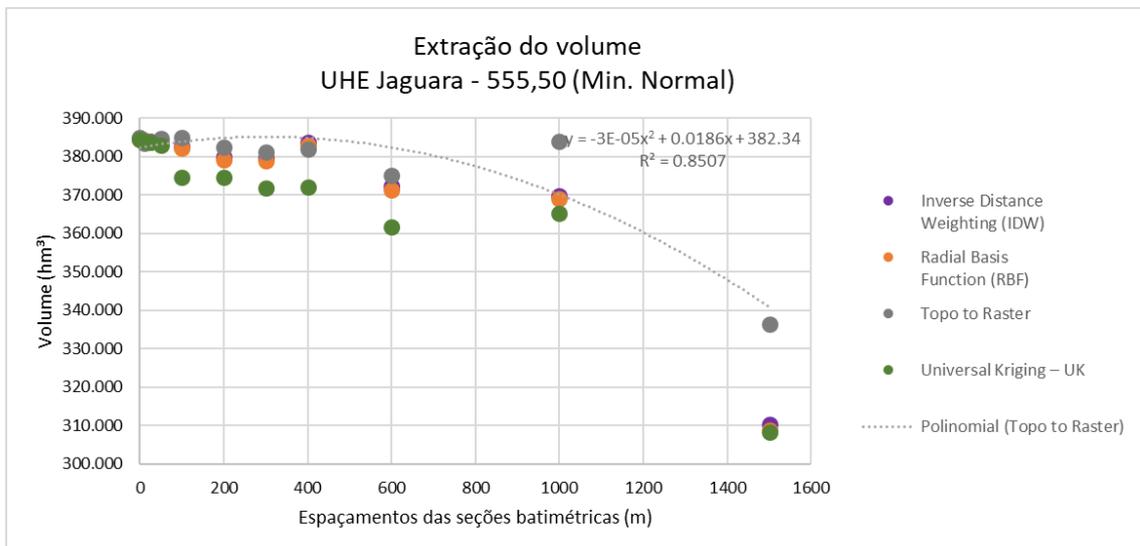
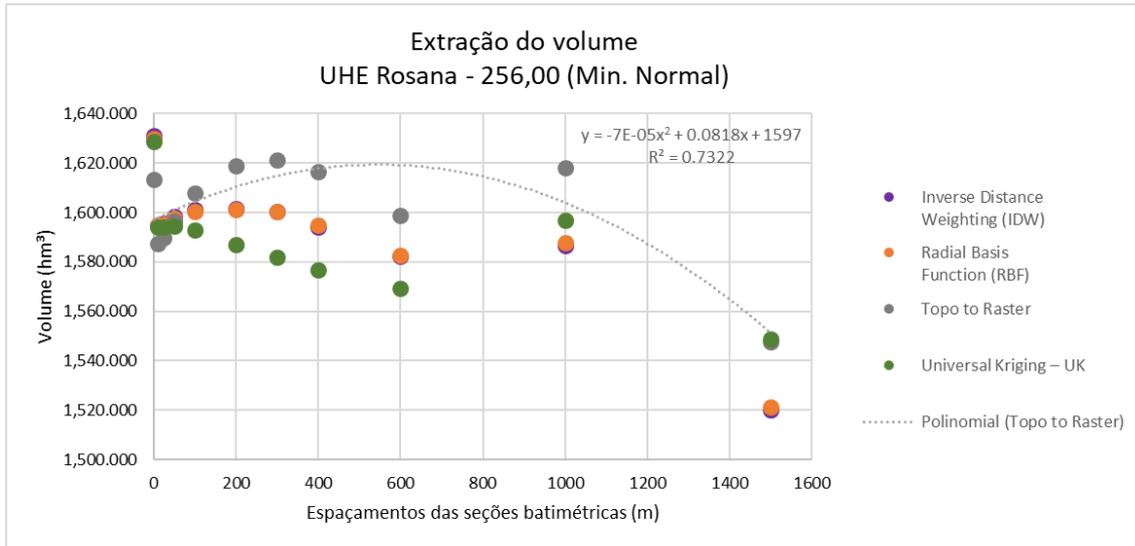


Figura 38 – Resultados UHE Rosana (Fonte: elaboração própria)



Pode-se observar que os resultados seguem um padrão, quanto maior o espaçamento entre as seções batimétricas maior a variação entre os interpoladores. Além disso, nota-se que o volume calculado para os maiores espaçamentos é menor quando comparados aos menores espaçamentos. Destaca-se que os gráficos com maiores variações entre os valores dos interpoladores estão associados aos reservatórios com mais braços e diferença de limites.

Segundo o documento orientativo da Agência Nacional de Águas (2022) os espaçamentos das linhas de sondagem (E_{st}) dependem da área do reservatório (A), em hectares, e da extensão do reservatório (D), em quilômetros, ambos em seu nível operacional normal. Conforme como apresentado na (Equação 4).

$$E_{st} = \frac{0,35A^{0,35}}{D} \text{ (Equação 4)}$$

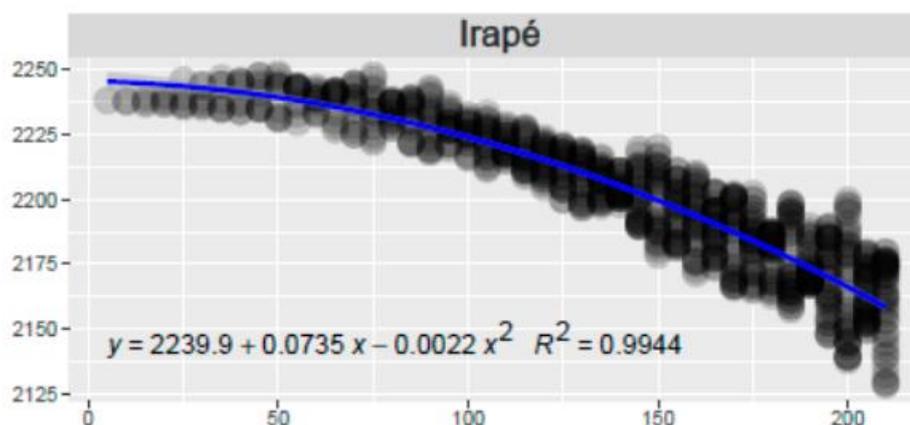
A partir da equação acima foi calculado o espaçamento estimado para cada usina, os quais podem ser analisados na Tabela 3. Adicionalmente consta as informações de volume extraídos para as linhas espaçadas e com as linhas sem espalhamento, o multifeixe. Por fim, foi calculada a diferença entre os dados extraídos e sua respectiva porcentagem de diferença, observa-se que as maiores diferenças não estão vinculadas necessariamente com os maiores espaçamentos.

Tabela 3 – Espaçamento das linhas de sondagem

Usinas	Fórmula para cálculo de espaçamento		Multifeixe	Diferença entre os volumes calculados	Diferença entre os volumes calculados (%)
	Espaçamento das linhas de sondagem	Volume (m³)	Volume (m³)		
UHE Água Vermelha	143m	5436.125	5541.38	105.255	2%
UHE Bariri	145m	399.019	422.736	23.717	6%
UHE Caconde	275m	183.772	225.764	41.992	19%
UHE Canoas I	208m	188.768	193.415	4.647	2%
UHE Canoas II	200m	128.165	133.96	5.795	4%
UHE Capivara	184m	5367.14	5462.398	95.258	2%
UHE Chavantes	226m	5626.754	5792.473	165.719	3%
UHE Ibitinga	276m	783.288	850.444	67.156	8%
UHE Irapé	154m	2041.493	2169.178	127.685	6%
UHE Jaguará	302m	375.349	384.554	9.205	2%
UHE Rosana	130m	1595.571	1629.384	33.813	2%

O trabalho de França (2019) analisou o reservatório da UHE Irapé, estimando volumes para diferentes espaçamentos com diferentes localizações das seções. A Figura 39 apresenta no eixo x o espaçamento das seções em metros e no eixo y o volume extraído em hm³, observamos que há uma significativa variação de volume para o mesmo espaçamento e diferente localização das seções.

Figura 39 – Resultados UHE Rosana (Fonte: França, 2019)



5. CONCLUSÃO

A Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 127 foi criada com o objetivo de acompanhar e monitorar o assoreamento dos reservatórios das usinas hidrelétricas. Este trabalho averiguou os diferentes métodos de aquisição batimétrica e de interpolações. O objetivo final era a análise do cálculo de volume.

O trabalho respondeu as duas perguntas questionadas no início do trabalho. Todos os métodos de interpolações apresentaram volumes muito semelhantes na metodologia de aquisição multifeixe, o método mais recomendado pelo documento orientativo é o método *topo to raster*. A última questão versou sobre a influência na estimativa do volume de acordo com a mudança nos espaçamentos das linhas transversais, observamos nos resultados que quanto maior o espaçamento menor o volume calculado.

A análise estatística multivariada identificou dois reservatórios anômalos: i) a UHE Irapé está situada em uma bacia diferente das demais usinas analisadas, e ii) a UHE Caconde, que está situada em um rio distinto dentro da bacia do Grande. A UHE Irapé caracteriza-se por exibir uma anomalia nos quatro índices de complexidade do terreno quando comparado aos demais reservatórios. Analisando o modelo digital do terreno, pode-se observar que as profundidades estão limitadas ao canal do rio Jequitinhonha e as demais áreas do reservatório mais rasas. Adicionalmente, este rio exibe extenso comprimento e áreas alagadas. Tais características indicam que a UHE Irapé é um exemplo distinto das demais áreas analisadas, justificando os valores anômalos dos índices.

A UHE Caconde possui características morfológicas similares à UHE Irapé: i) ocorrência de áreas alagadas, com maiores profundidades limitadas a calha original do rio, e ii) vários afluentes conectados ao rio principal. Tais dados resultam em índices de complexidade de terreno superiores para a usina quando comparado as demais, em concordância com a UHE Irapé.

Em relação ao volume dos reservatórios, os dados revelaram que o mesmo varia de acordo com o espaçamento das seções batimétricas e a localização das mesmas. Para todos os reservatórios observa-se que o volume

com o espaçamento de 1500m é inferior ao de 0m, notando-se uma variação numérica de acordo com o tipo de método de interpolação utilizado. Comparando com os resultados de França (2019), foi confirmado que ao aumentar os espaçamentos entre as seções os valores de volume regrediram e, complementarmente, confirmou que a localização das seções transversais está diretamente relacionada com os resultados de volume calculados.

Constatou-se que os reservatórios com menos alterações de limites, como afluentes, apresentaram uma menor discrepância entre os resultados dos interpoladores. Confirmando que usinas com mais braços apresentam uma variação maior de volume de acordo com a localização das seções.

Dessa forma, conclui-se que a bacia e rio influenciam nos resultados dos índices de complexidade de terreno e, conseqüentemente, na análise de cluster e componente principal. Rios que mantiveram sua calha definida, com muitas alagadas e afluentes tendem a apresentar índices de complexidade de terreno anômalos, os quais requerem aquisição batimétrica minuciosa, considerando que o espaçamento das seções em levantamentos monofeixe podem influenciar no cálculo de volume do reservatório. Complementarmente, levantamentos multifeixe asseguram uma representação precisa do assoalho do rio, a partir da ausência de espaçamento entre as seções durante a aquisição.

Adicionalmente, na comparação entre o volume dos dados multifeixe e monofeixe, com espaçamento calculado pela fórmula indicada no documento orientativo da ANA, observou-se que para o reservatório de Caconde houve uma redução de 19% quando comparado a varredura completa da área, as menores variações observadas foram de 2% a menos. Confirmando que os volumes calculados com levantamentos monofeixe fornecem resultados sistematicamente inferiores.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Orientações para atualização das curvas cota x área x volume. v. D, p. 40, 2022.

AMANTE, C.; EAKINS, B. Accuracy of interpolated bathymetry in digital elevation models. *Journal of Coastal Research*, vol. 76, no. sp1, p. 123–133, 1 Dec. 2016. <https://doi.org/10.2112/SI76-011>.

ARCGIS ONLINE. Calcular Declividade. Disponível em: <https://doc.arcgis.com/pt-br/arcgis-online/analyze/calculate-slope.htm>. Acesso em: 26 out. 2021.

ARCGIS ONLINE. Slope (3D Analyst). Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/slope.htm>. Acesso em: 26 out. 2021.

ARCMAP. Curvature function. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>. Acesso em: 26 out. 2021.

BORMANN, P. et al. Seismic Wave Propagation and Earth models. *In: New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)*, 2020. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, p.1-105. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch2.

COSTA, A. MÓDULO 5 Geoestatística: Introdução à interpolação espacial. 2015.

COSTA, E, MEDEIROS, E. Estudo sobre a propagação acústica em águas rasa. *In: Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*, 2015. Lisboa.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. 2º Edição. São Paulo: Editora Edgar Bluncher, 1980.

DAVIS, J. C. *Statistics and Data Analysis in Geology*. 3ª Edição. John Wiley & Sons, Inc, 2002, p.487-500 e p.509-523.

DRUCK, S. et. al. *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Capítulo 3, *Análise de Superfície por Geoestatística Linear*. Brasília: EMBRAPA, 2004.

FRANÇA, P. Avaliação Comparativa de Métodos e Técnicas Batimétricas na Obtenção das Curvas Cota X Área X Volume de Reservatórios em Usinas Hidrelétricas. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

FURNANS, J; AUSTIN, B. Hydrographic survey methods for determining reservoir volume. *Environmental Modelling and Software*, vol. 23, no. 2, p. 139–146, Feb. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.05.011>.

GAGG, G. Apostila de Levantamentos Hidrográficos. Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2016.

GANG, S. et. al. Data Analysis of Elevation Standard Deviation Classifying Geomorphological Types. *In: International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*, v. 15, p. V15–294, 2010.

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*, vol. 12, no. 8, p. 875–890, 1998. <https://doi.org/10.1080/136588198241545>.

HUGGETT, R.J. *Fundamentals of Geomorphology*. 3ª Edição. Oxon: Editora Taylor & Francis e-Library, 2011.

KIS, I. Comparasion of Ordinary and Universal Kriging interpolation techniques on a deph variable (a case of linear spatial trend), case study of the Sandrovac Field. *The Mining Geology Petroleum Engineeting Bulletin*, 528.9:912, 2016. DOI: 10.17794/rgn.2016.2.4

LEVIN, E.; et al. Bathymetric surveying in Lake Superior: 3D modeling and sonar equipment comparing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W10, p. 101–106, 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-101-2019>.

LI, Z., et al. Exploring Modern Bathymetry: A Comprehensive review of data aquisition devices, model accuracy, and interpolation techniques for

enhanced underwater mapping. *Frontiers in Marine Science*, v. 10, 2023. DOI 10.3389/fmars.2023.1178845

LOPES, J. SANTOS, R. Capacidade de Reservatórios. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

LURTON. X. Na *Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*, Ch. 2. Praxis Publ., 2002.

Manual on Hydrography. 1ª Edição. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2005.

MATOS, A. Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional “CAV-NH”. 2012. Curso de pós-graduação - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MATOS, A. et al. Variação de Volume Calculado em Grande Reservatórios Utilizando Diferentes Metodologias de Levantamentos Batimétricos. *In: XIV World Water Congress*, 2011.

MAZZINI, P. SCHETTINI, C. Avaliação de Metodologias de Interpolação Espacial Aplicadas a Dados Hidrográficos Costeiros Quase-Sinóticos. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v. 13, n. 1, p. 53-64, 2009.

METADADOS, Cota x Área x Volume dos Reservatórios de Usinas Hidrelétricas. Agência Nacional de Águas, 2019. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b8f0487a-df73-4f8d-8b22-bb49cf9f3683>>. Acesso em: 09/09/2021.

MINHONI, R. BRITO, G. AZEVEDO, R. Uso de Ecobatímetro Monofeixe na Determinação da Curva Cota x Área x Volume do Reservatório da PCH Pipoca – Minas Gerais – Brasil. *ISSN 1808-3765*, v.22, n.1, p. 87-100, 2017.

PASQUALETTO, A. et. al. Water resources availability and demand in Brazil/Disponibilidade e demanda de recursos hídricos no Brasil. *Informe GEPEC*, [S. I.], v. 26, n. 1, p. 46–61, 2022. DOI: 10.48075/igepec.v26i1.27755. Disponível em: <https://e->

revista.unioeste.br/index.php/gepec/article/view/27755. Acesso em: 5 out. 2023.

PERERA, D. et. al. Present and Future Losses of Storage in Large Reservoirs Due to Sedimentation: A Country-Wise Global Assessment. *Sustainability* 2023, 15, 219. <https://doi.org/10.3390/su15010219>

RIOS, M. A. Cartografia geotécnica e visões fractais da geometria do relevo. Dissertação – Departamento de engenharia civil e ambiental – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

SeaBeam. Multibeam Sonar Theory of Operation. L-3 Communications SeaBeam Instruments, 141 Washington Street, 2000.

SILVEIRA, P, MAMEDE, G. Avaliação da aplicação de modelos de desprendimento em bacia experimental do semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.14, n.01, 396-406, 2021.

SOUZA, L. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasa. Tese – Instituto Oceanográfico - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA, L., GANDOLFO, O. Geofísica Aplicada a Geologia de Engenharia e Meio Ambiente. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, 2021, p. 79-101.

SUGUIO, K. *Geologia Sedimentar*. 1ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA., 2003, p.30.

WILSON, J.; et. al. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Marine Geodesy*, vol. 30, no. 1–2, p. 3–35, Jan. 2007. <https://doi.org/10.1080/01490410701295962>.

WOLFL, A., et al. Seafloor Mapping – The Challenge of a Truly Global Ocean Bathymetry. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 6, 2019. Doi: 10.3389/fmars.2019.00283

7. LISTA DE ANEXOS

7.1. DADOS TABULARES ÍNDICES

		UHE Água Vermelha	UHE Caconde	UHE Jaguará
Desvio padrão da declividade (Slope)	Mínimo	0.000	0.000	0.001
	Máximo	26.342	34.926	47.736
	Média	2.126	8.668	4.327
	Desvio padrão	2.124	6.435	5.229
Curvatura Total (Curvature)	Mínimo	0.000	0.000	0.000
	Máximo	22.568	18.294	35.004
	Média	0.194	0.895	0.770
	Desvio padrão	0.281	1.348	1.211
Diferença de Altura Local (Focal Statistic)	Mínimo	0.000	0.000	0.000
	Máximo	10.293	11.675	15.157
	Média	0.763	2.323	1.024
	Desvio padrão	0.742	1.788	1.247
Rugosidade (TRI)	Mínimo	0.000	0.000	0.000
	Máximo	9.832	10.166	13.614
	Média	0.767	2.312	1.026
	Desvio padrão	0.730	1.723	1.215

Anexo I - Dados dos Índices dos Reservatórios da Bacia do Grande

		UHE Bariri	UHE Ibitinga
Desvio padrão da declividade (Slope)	Mínimo	0.000	0.000
	Máximo	43.053	27.734
	Média	2.601	2.233
	Desvio padrão	3.738	2.921
Curvatura Total (Curvature)	Mínimo	0.000	0.000
	Máximo	15.186	12.455
	Média	0.496	0.331
	Desvio padrão	0.688	0.411
Diferença de Altura Local (Focal Statistic)	Mínimo	0.000	0.000
	Máximo	10.734	10.980
	Média	0.474	0.807
	Desvio padrão	0.674	1.013
Rugosidade (TRI)	Mínimo	0.000	0.000
	Máximo	11.225	10.067
	Média	0.471	0.841
	Desvio padrão	0.655	1.010

Anexo II - Dados dos Índices dos Reservatórios da Bacia do Tiete

		UHE Canoas I	UHE Canoas	UHE Capivara	UHE Chavantes	UHE Rosana
Desvio padrão da declividade (Slope)	Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Máximo	33.041	31.956	33.362	60.423	32.920
	Média	3.196	3.285	3.272	6.721	2.409
	Desvio padrão	3.681	3.824	2.659	5.937	2.899
Curvatura Total (Curvature)	Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Máximo	29.797	35.620	15.048	39.948	35.846
	Média	0.839	0.759	0.209	0.663	0.445
	Desvio padrão	1.093	1.014	0.276	0.992	0.730
Diferença de Altura Local (Focal Statistic)	Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Máximo	8.927	8.343	11.991	19.316	7.317
	Média	0.746	0.762	1.146	1.225	0.439
	Desvio padrão	0.822	0.858	0.956	1.132	0.524
Rugosidade (TRI)	Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Máximo	7.942	7.422	12.755	16.163	11.298
	Média	0.772	0.780	1.135	1.195	0.436
	Desvio padrão	0.816	0.848	0.916	1.081	0.508

Anexo III - Dados dos Índices dos Reservatórios da Bacia do Paranapanema

		UHE Irapé
Desvio padrão da declividade (Slope)	Mínimo	0.002
	Máximo	64.076
	Média	20.637
	Desvio padrão	10.508
Curvatura Total (Curvature)	Mínimo	0.000
	Máximo	39.873
	Média	2.223
	Desvio padrão	2.573
Diferença de Altura Local (Focal Statistic)	Mínimo	0.000
	Máximo	31.156
	Média	5.791
	Desvio padrão	3.436
Rugosidade (TRI)	Mínimo	0.000
	Máximo	29.189
	Média	5.707
	Desvio padrão	3.308

Anexo IV - Dados dos Índices dos Reservatórios da Bacia Atlântico Trecho Leste

7.2. DADOS TABULARES DAS FERRAMENTAS DE INTERPOLAÇÃO

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	Média	Desvio Padrão
1500	5,243.635	5,212.076	5,219.678	4,945.707	5,078.891	191.125
1000	5,299.144	5,278.714	5,283.370	5,055.660	5,167.187	146.140
600	5,374.259	5,335.937	5,431.397	5,228.133	5,282.035	90.147
400	5,423.037	5,406.566	5,482.513	5,320.558	5,372.415	66.111
300	5,449.381	5,431.681	5,510.098	5,379.660	5,427.993	48.765
200	5,442.881	5,429.369	5,493.162	5,414.089	5,436.125	30.223
100	5,450.650	5,446.760	5,484.400	5,449.713	5,449.713	14.513
50	5,456.428	5,460.218	5,475.369	5,460.426	5,460.426	12.803
25	5,460.376	5,462.956	5,469.638	5,462.621	5,462.788	11.306
10	5,462.563	5,463.297	5,465.338	5,463.160	5,463.228	5.719
0	5,541.353	5,541.407	5,541.748	5,541.224	5,541.380	4.830

Anexo V - Dados UHE Água Vermelha

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	Média	Desvio Padrão
1500	298.440	291.917	270.416	248.270	259.343	23.996
1000	334.546	328.439	310.769	292.854	301.812	28.466
600	372.560	365.355	363.578	342.806	353.192	20.371
400	390.465	384.303	385.257	368.333	376.318	17.241
300	394.381	388.350	393.409	378.296	383.323	14.701
200	405.633	401.249	409.076	396.789	399.019	13.591
100	412.496	411.547	417.584	410.327	410.937	9.702
50	416.981	418.895	420.446	416.930	416.956	8.029
25	419.048	420.976	420.864	419.267	419.267	6.230
10	420.135	421.081	420.840	420.111	420.123	6.135
0	422.752	422.750	422.619	422.735	422.736	0.661

Anexo VI - Dados UHE Bariri

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	Média	Desvio Padrão
1500	154.587	149.691	47.236	52.186	52.186	59.220
1000	159.276	154.261	75.795	86.098	86.098	51.673
600	198.706	190.835	116.281	90.257	103.269	65.048
400	214.538	207.825	183.055	128.149	155.602	65.030
300	226.052	219.403	210.834	156.710	183.772	55.515
200	221.709	214.759	208.938	172.967	190.952	37.780
100	219.289	213.884	223.677	204.920	209.402	21.129
50	220.989	218.788	226.276	219.151	219.151	8.470
25	222.862	223.547	225.673	223.999	223.773	7.891
10	224.450	225.226	225.327	225.119	225.119	3.735
0	225.631	225.913	225.897	225.764	225.764	8.223

Anexo VII - Dados UHE Caconde

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	Média	Desvio Padrão
1500	144.008	145.104	149.134	147.242	147.242	4.453
1000	173.380	174.041	173.848	173.061	173.061	4.543
600	175.109	175.468	175.866	173.105	173.105	4.743
400	189.905	190.168	190.322	187.032	187.032	6.359
300	191.461	191.622	191.802	188.125	188.125	7.024
200	190.170	190.136	192.684	187.399	187.399	7.981
100	192.222	192.225	194.090	190.755	190.755	8.444
50	192.569	192.508	193.768	192.008	192.008	8.635
25	192.614	192.535	193.175	192.442	192.442	8.688
10	192.650	192.742	192.772	192.584	192.584	8.663
0	193.342	193.386	193.376	193.445	193.445	1.005

Anexo VIII - Dados UHE Canoas I

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	Média	Desvio Padrão
1500	93.994	94.735	104.217	91.135	93.994	4.582
1000	112.996	113.839	110.953	112.179	112.179	1.005
600	115.023	115.068	115.805	111.286	111.286	3.281
400	124.402	124.503	123.648	120.171	120.171	4.940
300	128.585	128.680	128.954	124.905	124.905	5.089
200	129.718	129.518	130.751	126.812	126.812	6.138
100	131.708	131.476	133.226	130.270	130.270	6.769
50	132.412	132.240	133.460	131.864	131.864	7.314
25	132.708	132.671	133.110	132.527	132.527	7.398
10	132.854	132.910	132.884	132.782	132.782	7.459
0	133.952	133.989	133.655	133.960	133.960	0.479

Anexo IX - Dados UHE Canoas II

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	Média	Desvio Padrão
1500	4885.534	4770.939	4608.945	4226.171	4,226.171	942.779
1000	5156.475	5051.458	5006.660	4627.119	4,627.119	1,066.196
600	5245.267	5144.312	5275.067	4938.146	4,938.146	1,125.112
400	5336.745	5253.538	5422.328	5170.072	5,170.072	1,175.262
300	5351.043	5284.828	5452.492	5269.709	5,269.709	1,199.966
200	5372.444	5339.489	5477.119	5367.140	5,367.140	1,227.143
100	5414.273	5435.905	5476.989	5446.578	5,435.905	1,251.871
50	5438.809	5463.511	5472.382	5460.247	5,460.247	1,257.902
25	5449.345	5464.239	5469.968	5462.092	5,462.092	1,259.672
10	5458.085	5463.070	5466.041	5451.351	5,458.085	1,258.711
0	5,460.978	5,462.508	5,464.786	5,462.288	5,462.288	96.955

Anexo X - Dados UHE Capivara

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	Média	Desvio Padrão
1500	4,972.134	4,923.868	4,719.442	4,221.449	4,221.449	953.544
1000	5,469.314	5,423.437	5,234.889	4,834.659	4,834.659	1,034.948
600	5,462.584	5,414.911	5,395.730	5,060.740	5,060.740	1,099.869
400	5,629.877	5,581.817	5,618.065	5,350.743	5,350.743	1,186.276
300	5,668.003	5,624.840	5,718.119	5,490.004	5,490.004	1,211.153
200	5,715.568	5,678.508	5,777.525	5,574.999	5,574.999	1,239.419
100	5,743.621	5,727.257	5,798.374	5,704.715	5,711.509	1,275.371
50	5,762.767	5,768.132	5,794.507	5,772.180	5,768.388	1,289.987
25	5,773.748	5,783.031	5,789.745	5,781.823	5,781.823	1,292.920
10	5,778.649	5,782.893	5,786.502	5,782.270	5,782.270	1,293.283
0	5,787.791	5,791.967	5,788.416	5,792.980	5,792.980	41.564

Anexo XI - Dados UHE Chavantes

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	Média	Desvio Padrão
1500	703.781	697.622	657.921	625.304	657.921	49.535
1000	722.392	716.679	689.208	651.678	651.678	50.447
600	756.357	747.588	750.557	710.281	710.281	65.296
400	786.617	779.460	791.939	754.060	754.060	67.957
300	797.769	789.569	803.096	777.008	777.008	71.027
200	806.117	800.182	816.445	796.900	796.900	75.272
100	812.399	811.141	821.635	813.373	812.399	78.793
50	815.957	815.554	820.827	818.519	815.957	79.912
25	817.710	818.140	819.816	819.227	818.140	80.373
10	818.412	819.231	818.996	819.114	818.996	80.378
0	850.628	850.617	850.313	850.444	850.444	1.047

Anexo XII - Dados UHE Ibitinga

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	Média	Desvio Padrão
1500	1744.434	1697.007	1540.930	1317.834	1,317.834	310.281
1000	1733.580	1674.528	1466.384	1271.679	1,271.679	392.080
600	1879.083	1824.925	1741.363	1532.704	1,532.704	442.638
400	2040.655	1979.243	2001.107	1798.426	1,798.426	501.866
300	2072.074	2015.050	2056.828	1875.891	1,875.891	494.075
200	2118.777	2071.349	2131.417	2011.638	2,011.638	515.970
100	2126.186	2103.228	2157.925	2112.111	2,112.111	545.886
50	2141.863	2144.901	2161.526	2155.779	2,155.779	561.031
25	2156.416	2169.563	2160.250	2168.642	2,168.642	567.075
10	2165.195	2170.077	2158.570	2169.484	2,169.484	572.212
0	2,168.094	2,169.261	2,169.957	2,169.096	2,169.096	75.488

Anexo XIII - Dados UHE Irapé

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	Média	Desvio Padrão
1500	310.347	308.905	336.299	308.413	308.905	11.127
1000	369.770	369.036	383.856	365.280	365.354	7.754
600	372.440	371.262	375.237	361.587	363.654	5.851
400	383.737	382.909	381.911	372.176	372.176	8.205
300	379.677	378.927	381.199	371.771	371.771	8.934
200	379.831	379.108	382.487	374.687	374.687	10.739
100	382.782	382.297	385.098	374.687	380.690	10.712
50	383.722	383.408	384.682	383.022	383.022	11.084
25	383.921	383.831	383.874	383.678	383.678	11.247
10	384.220	384.306	383.387	384.089	384.089	11.321
0	384.750	384.586	384.914	384.522	384.586	3.555

Anexo XIV - Dados UHE Jaguará

Espaçamento (m)	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Radial Basis Function (RBF)</i>	<i>Topo to Raster</i>	<i>Universal Kriging – UK</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
1500	1,520.166	1,521.175	1,547.832	1,548.808	1,548.320	31.279
1000	1,586.789	1,587.745	1,618.294	1,596.856	1,592.300	31.342
600	1,582.184	1,582.572	1,598.835	1,569.281	1,575.733	27.080
400	1,594.257	1,594.868	1,616.750	1,576.727	1,585.492	30.743
300	1,600.421	1,600.366	1,621.480	1,581.917	1,591.142	26.083
200	1,601.791	1,601.101	1,619.059	1,586.903	1,601.446	17.282
100	1,601.227	1,600.436	1,608.057	1,593.127	1,596.782	20.811
50	1,598.635	1,597.810	1,596.444	1,594.699	1,595.571	17.652
25	1,595.875	1,595.245	1,589.626	1,594.153	1,594.153	16.875
10	1,595.041	1,594.883	1,587.252	1,594.224	1,594.224	17.376
0	1,631.140	1,629.933	1,613.277	1,628.836	1,629.384	8.281

Anexo XV - Dados UHE Rosana