

**FELIPE CATÃO MESQUITA SANTOS**

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA COMPARAÇÃO DE CURVAS COTA X ÁREA  
X VOLUME (CAV) PARA CÁLCULO DO ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS**

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

Orientador: Italo Oliveira Ferreira

Coorientador: Júlio Cesar de Oliveira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237a  
2024 Santos, Felipe Catão Mesquita, 1998-  
Avaliação de métodos para comparação de curvas cota x  
área x volume (cav) para cálculo do assoreamento de  
reservatórios / Felipe Catão Mesquita Santos. – Viçosa, MG,  
2024.

1 dissertação eletrônica (52 f. ): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Ítalo Oliveira Ferreira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Civil, 2024.

Referências bibliográficas: f. 44-48.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.569>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Modelos digitais de elevação. 2. Assoreamento.  
3. Batímetro . I. Ferreira, Ítalo Oliveira, 1988-. II. Universidade  
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 551.410285

FELIPE CATÃO MESQUITA SANTOS

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA COMPARAÇÃO DE CURVAS COTA X ÁREA X VOLUME (CAV) PARA CÁLCULO DO ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS**

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

APROVADA: 30 de Agosto de 2024.

Assentimento:

---

Felipe Catão Mesquita Santos

Documento assinado digitalmente



ITALO OLIVEIRA FERREIRA

Data: 24/09/2024 11:06:28-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Italo Oliveira Ferreira

Orientador

Documento assinado digitalmente



JULIO CESAR DE OLIVEIRA

Data: 24/09/2024 13:34:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Júlio Cesar de Oliveira

Coorientador

*Aos meus pais e irmãos.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria ao longo desta jornada.

Aos meus pais, irmãos e a Estela, que formam a minha base mais sólida, todo o sacrifício é por vocês.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar este curso de pós-graduação e por todo o suporte oferecido.

À CAPES, que foi essencial para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Italo Oliveira Ferreira, pela orientação, paciência, e por compartilhar seu conhecimento e experiência ao longo do desenvolvimento da minha carreira, me ensinou tudo o que sei.

Ao coorientador, Professor Júlio Cesar de Oliveira, pelas valiosas contribuições e orientações durante o desenvolvimento de ferramentas para a área, tornando-se uma contribuição por todo o conhecimento adquirido.

À CEMIG e ao GPHIDRO, por fornecerem os dados, equipamentos e o suporte necessários para a realização dos levantamentos batimétricos.

À Victoria Gibrim, amiga que me acompanhou desde o início da graduação, obrigado pela paciência e todo o suporte durante a vida acadêmica.

Aos colegas e amigos do programa de Informações Espaciais da Universidade Federal de Viçosa, pelo apoio, companheirismo e pela troca de ideias que enriqueceram este trabalho.

A todos os professores e funcionários da Universidade Federal de Viçosa, que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação acadêmica.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero muito obrigado.

*“Hidrografia! Hidrografia! Restará sempre muito o que  
fazer...”.*

(Diretoria de Hidrografia e Navegação)

## RESUMO

SANTOS, Felipe Catão Mesquita, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2024. **AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA COMPARAÇÃO DE CURVAS COTA X ÁREA X VOLUME (CAV) PARA CÁLCULO DO ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS**. Orientador: Italo Oliveira Ferreira. Coorientadores: Julio Cesar de Oliveira.

Diante do desafio do monitoramento do assoreamento nos reservatórios no Brasil, que compromete significativamente a eficácia operacional e a capacidade de armazenamento dessas infraestruturas críticas, esta pesquisa foca na análise da dinâmica de assoreamento no reservatório UHE Rosal. Foram aplicados quatro interpoladores principais: Topo to Raster, Krigagem, IDW e TIN, com base em dados batimétricos coletados nos anos de 2016 e 2023. A partir dessas informações, foram gerados Modelos Digitais de Terreno e Curvas Cota x Área x Volume, permitindo uma avaliação detalhada das alterações morfológicas do reservatório e do impacto da deposição de sedimentos ao longo do tempo. Os resultados mostraram que os interpoladores apresentaram comportamentos distintos quanto às variações de volume entre os dois períodos analisados. O interpolador TIN indicou uma significativa redução de volume, sugerindo uma maior deposição de sedimentos e, portanto, maior impacto do assoreamento. Por outro lado, os interpoladores Topo to Raster, Krigagem e IDW apontaram um aumento de volume, o que pode estar relacionado a fatores como a metodologia de levantamento e a distribuição de pontos de amostragem, uma vez que o assoreamento, por definição, deveria reduzir o volume útil do reservatório. Além da análise volumétrica, foram calculados estimadores estatísticos como RMSE, MAE,  $R^2$  e MAPE para avaliar a precisão dos interpoladores. Entre os métodos, o TIN apresentou as maiores discrepâncias nos estimadores de erro, porém foi o interpolador que melhor captou a tendência de redução de volume, consistente com o assoreamento. Já o Topo to Raster e o IDW exibiram melhores resultados nos estimadores, embora tenham apresentado resultados que sugerem um comportamento de volume inesperado, possivelmente devido à variabilidade dos dados.

Palavras-chave: MDT, Assoreamento, Batimetria, Modelagem, GIS

## ABSTRACT

SANTOS, Felipe Catão Mesquita, M.Sc., Federal University of Viçosa, July 2024. **EVALUATION OF METHODS FOR COMPARING ELEVATION-AREA-VOLUME (EAV) CURVES FOR SILTATION CALCULATION IN RESERVOIRS.** Advisor: Italo Oliveira Ferreira. Co-advisors: Julio Cesar de Oliveira.

Given the challenge of monitoring sedimentation in reservoirs in Brazil, which significantly compromises the operational efficiency and storage capacity of these critical infrastructures, this research focuses on analyzing the sedimentation dynamics in the UHE Rosal reservoir. Four main interpolators were applied: Topo to Raster, Kriging, IDW, and TIN, based on bathymetric data collected in 2016 and 2023. From this data, Digital Terrain Models and Elevation x Area x Volume Curves were generated, allowing for a detailed assessment of the reservoir's morphological changes and the impact of sediment deposition over time. The results showed that the interpolators exhibited different behaviors regarding volume variations between the two periods analyzed. The TIN interpolator indicated a significant reduction in volume, suggesting greater sediment deposition and, consequently, a higher impact of sedimentation. On the other hand, the Topo to Raster, Kriging, and IDW interpolators showed an increase in volume, which may be related to factors such as survey methodology and the distribution of sampling points, since sedimentation, by definition, should reduce the reservoir's useful volume. In addition to the volumetric analysis, statistical estimators such as RMSE, MAE,  $R^2$ , and MAPE were calculated to assess the accuracy of the interpolators. Among the methods, TIN presented the largest discrepancies in the error estimators but was the interpolator that best captured the trend of volume reduction, consistent with sedimentation. Meanwhile, Topo to Raster and IDW showed greater consistency in the estimators, although they produced results that suggest an unexpected volume behavior, possibly due to data variability.

Keywords: DTM, Siltation, Bathymetry, Modeling, GIS

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de Curva CAV.

Figura 2 – Semivariograma Krigagem.

Figura 3 – Método IDW.

Figura 4 – TIN.

Figura 5 – Reservatório UHE Rosal.

Figura 6 – Fluxograma de atividades.

Figura 7 – Levantamento batimétrico realizado em 2016 na UHE Rosal.

Figura 8 – Levantamento batimétrico realizado em 2023 na UHE Rosal.

Figura 9 – Perfis de sondagem do levantamento batimétrico de 2023 antes e depois do tratamento de dados.

Figura 10 – Boxplot com as informações obtidas em cada batimetria.

Figura 11 – MDTs gerados para 2016.

Figura 12 – MDTs gerados para 2023.

Figura 13 – Distribuição de quadrículas para checagem de pontos de 2016.

Figura 14 – Distribuição de quadrículas para checagem de pontos de 2023.

Figura 15– Diferença de MDTs.

Figura 16 – Plugin "CAV".

Figura 17 – Curvas CAV.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Análise de interseções batimétricas.

Tabela 2 – Estimadores dos interpoladores.

Tabela 3 – Avaliação de diferença de volume. Tabela A.1 - Curva CAV gerado por Topo to Raster

Tabela A.2 - Curva CAV gerado por IDW

Tabela A.3 - Curva CAV gerado por Krigagem

Tabela A.4 - Curva CAV gerado por TIN

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANA - Agência Nacional de Águas  
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
CAV - Cota x Área x Volume  
CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico  
DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação  
DSG - Diretoria de Serviço Geográfico  
ET-CQDG - Especificação Técnica de Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais  
FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais  
GNSS - Global Navigation Satellite System  
Hm<sup>3</sup> - Hectômetros cúbicos  
IDW - Inverse Distance Weighting  
IHO - International Hydrographic Organization  
MAE - Mean Absolute Error  
MBES – Multi Beam Echo Sounder  
MDT - Modelo Digital de Terreno  
MGL - Modelo Geoidal Local  
NORMAM - Normas da Autoridade Marítima  
PCH - Pequenas Centrais Hidrelétricas  
PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens  
R<sup>2</sup>- Coefficient of Determination  
RMSE - Root Mean Square Error  
RTK - Real Time Kinematic  
RVG - Rede de Vértices Geodésicos  
SBES- Single Beam Echo Sounder  
SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens  
TIN - Triangulated Irregular Network  
UHE - Usina Hidrelétrica

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS.....	12
3.	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.1.	Barragens e reservatórios.....	13
3.2.	Curva Cota x Área x Volume .....	14
3.3.	Levantamento Hidrográfico por Métodos Geoacústicos .....	17
3.3.1.	Ecobatímetro monofeixe .....	17
3.4.	Interpoladores.....	18
3.4.1.	Topo to Raster .....	18
3.4.2.	Krigagem.....	19
3.4.3.	IDW .....	21
3.4.4.	TIN .....	22
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
4.1.	Localização e caracterização das áreas de estudo .....	22
4.2.	Metodologia .....	23
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
5.1.	Aquisição dos dados batimétricos .....	28
5.2.	Processamento e Controle de Qualidade dos dados.....	30
5.3.	Modelagem e Interpolação .....	32
5.4.	Análise do assoreamento .....	39
6.	CONCLUSÕES.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45
	APÊNDICE A.....	50

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta uma extensa malha hidrográfica, composta por uma variedade de reservatórios que desempenham um papel fundamental no abastecimento de água e na geração de energia para uma vasta população. No entanto, essas estruturas estão suscetíveis ao processo de assoreamento, o qual pode comprometer significativamente sua capacidade de armazenamento e funcionalidade. O assoreamento é caracterizado pelo acúmulo progressivo de sedimentos, incluindo areia, argila e materiais orgânicos, nos corpos d'água, como rios, lagos e reservatórios (ALVES & CAMPOS, 2009).

De acordo com Santos et al. (2020) as atividades humanas como agricultura, mineração e urbanização, têm sido os principais fatores responsáveis pelo aumento da erosão do solo e pelo assoreamento dos corpos d'água no Brasil. O assoreamento em rios e reservatórios é resultado de alterações no uso e ocupação do solo, bem como da falta de práticas de conservação e gestão hídrica, conforme apontado por Ferreira et al. (2017). Portanto, é de suma importância conhecer o volume útil dos reservatórios e suas características submersas para uma gestão adequada dos recursos hídricos.

Para obter essas informações, faz-se necessário realizar levantamentos que permitam a investigação da superfície submersa. Nesse contexto, o emprego de sistemas de sondagem acústicos tem sido utilizados em normativas para monitoramento a partir de coleta de dados de profundidade e informações das camadas submersas (ANA, 2010; ANA, 2013; ANA 2020). Diversos sistemas e sensores utilizam fontes acústicas como base para seu funcionamento, sendo diferenciados pelo espectro de frequências emitidas e até mesmo empregados na diferenciação de métodos sísmicos (SOUZA, 2006; FLORIANI, 2013). Esses sistemas, quando empregados em reservatórios de abastecimento de água e geração de energia, contribuem para a realização de projetos de engenharia, monitoramento e medidas que aumentam a vida útil do corpo hídrico. Para isso, a realização dessas análises, em períodos distintos, permite o monitoramento e controle do reservatório por meio de curvas que relacionam cota, área e volume, isto é, curvas Cota x Área x Volume (CAV).

Nesse contexto, é fundamental o desenvolvimento de ferramentas e aplicação de técnicas estatísticas para a análise da formação e acumulação de sedimentos, bem como seu impacto no volume dos corpos d'água. O objetivo principal deste trabalho é a análise dos processos já utilizados para a geração de modelos digitais que serão utilizados na atualização das curvas Cota x Área x Volume (CAV) e a estimativa do assoreamento. Para alcançar este fim, serão testados diferentes interpoladores para modelar as curvas, utilizando estimadores estatísticos que permitam identificar o modelo de melhor desempenho.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é realizar análises nas técnicas de modelagens para a geração e aplicação de curvas Cota x Área x Volume (CAV) no cálculo do assoreamento em reservatórios de água. Este estudo busca não apenas empregar e analisar ferramentas que possibilitem a geração de modelos mas também a confecção de curvas CAV com base em dados primários e secundários e também aplicar uma análise qualitativa e quantitativa do acúmulo de sedimentos. Além disso, visa a avaliação e otimização de diferentes métodos de interpolação para a geração

de Modelos Digitais de Terreno (MDT), com o propósito de aprimorar a precisão e eficiência na gestão de recursos hídricos, contribuindo para a formulação de estratégias mais sustentáveis de manejo de reservatórios.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. Barragens e reservatórios**

Barragens e reservatórios gerados artificialmente são construções que têm como objetivo aumentar a quantidade de água disponível e otimizar a gestão hídrica em determinada região (ANA, 2017). A Agência Nacional de Águas (ANA) é o órgão responsável por regulamentar e fiscalizar a gestão dos corpos hídricos que tem como objetivo o abastecimento de água e geração de energia no Brasil, produzindo normativas, resoluções e orientações para que as operadoras e concessionárias padronizem as gestões destes corpos hídricos.

De acordo com ANA (2013), barragens são estruturas físicas projetadas para reter a água de um curso fluvial, enquanto os reservatórios são corpos hídricos formados como resultado dessa retenção. A Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010, que criou a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), define uma barragem como "qualquer estrutura construída em um curso d'água permanente ou temporário com a finalidade de conter ou acumular substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, incluindo o barramento e outras estruturas relacionadas" (BRASIL, 2010). A disponibilidade de água em reservatórios de grande e pequeno porte é afetada pelas mudanças climáticas, vazão de operação e demanda hídrica (ANA, 2019). Devido a motivos como a má gestão hídrica e tempos de seca e estiagem tem como consequências a redução significativa na disponibilidade de água em reservatórios, resultando em um fornecimento restrito de água potável para consumo humano.

De acordo com a ANA (2009) o uso da água pode englobar diversos fins, incluindo, abastecimento humano e animal, geração de energia, diluição de efluentes, navegação, irrigação, pesca e aquicultura, entre outros. Cada reservatório, então, deve ser construído com determinados objetivos e ser operado com alguns cuidados especificados pela ANA. Seguindo orientações do Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos, os seguintes critérios devem ser considerados para operacionalização de reservatórios:

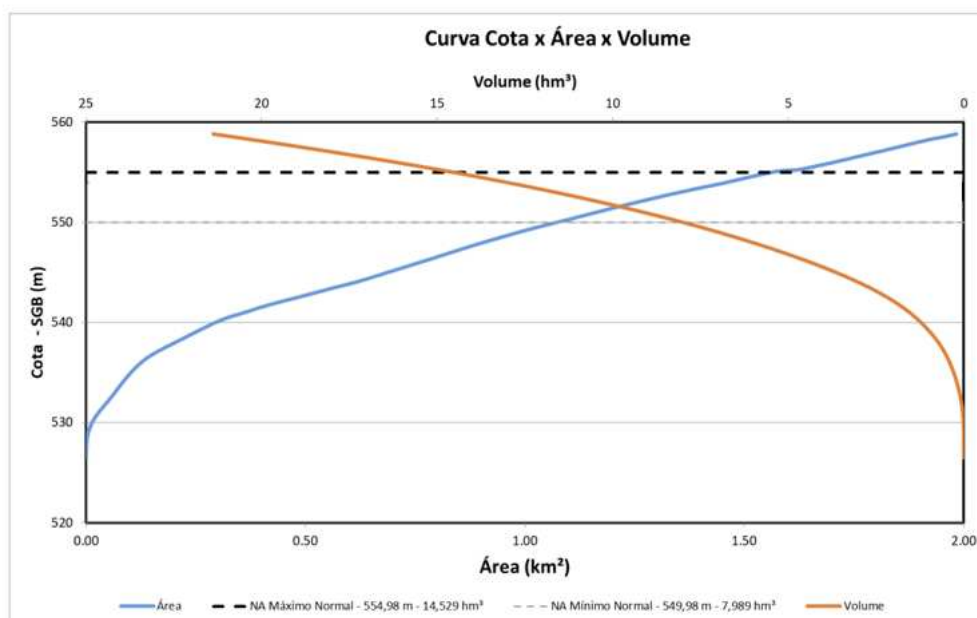
- Restrições operativas a montante e a jusante.
- Condições operativas nos demais reservatórios da bacia.
- Níveis d'água máximos e mínimos.
- Deplecionamento e replecionamento e taxas de variação dos níveis d'água.
- Tempo de residência.
- Capacidade de turbinamento.
- Vazões remanescentes.
- Simulação do comportamento do reservatório na cascata

Para que a operação ocorra de forma contínua o nível d'água, volume e monitoramento do reservatório deve ocorrer diariamente para que sejam analisadas possíveis intervenções (ANA, 2013).

### 3.2. Curva Cota x Área x Volume

A modelagem matemática que relaciona a capacidade de armazenamento de um reservatório e a área de sua superfície com sua cota (nível) são comumente conhecidas como curvas Cota X Área X Volume. Devido ao fato de os reservatórios funcionarem como acumuladores de sedimentos e facilitarem o processo de assoreamento, a curva CAV é crucial para a definição de normas operacionais, análises de disponibilidade e demanda, além da determinação do volume do reservatório para o controle de enchentes e abastecimento de água (MATOS, 2012; KUHNNEN, 2020). A Figura 1 abaixo ilustra uma curva Cota x Área x Volume evidenciando seus respectivos eixos e valores em uma análise.

Figura 1 – Exemplo de Curva CAV



Fonte: Autor (2024)

Por meio da Resolução Conjunta nº 127, em 26 de julho de 2022, a ANEEL e a ANA aprimoraram as normas e instrumentos estabelecidos. De acordo com essa resolução, a curva CAV deve ser atualizada através de levantamentos topográficos e batimétricos com uma periodicidade máxima de 10 anos, podendo ser reduzida de acordo com a necessidade, conforme descrito a seguir:

Art. 8º Para as usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, o processo de assoreamento do reservatório deverá ser avaliado com base na atualização das curvas cota-área-volume realizada pelo concessionário ou autorizado, da seguinte forma:

I. Para empreendimentos que, na data de publicação desta Resolução, estiverem em operação há oito anos ou mais, a atualização deverá ser feita no

prazo de até 24 meses contados da data de publicação desta Resolução e, a partir da referida atualização, a cada 10 anos;

II. Para os demais empreendimentos não atingidos pelo inciso I, a atualização deverá ser realizada a cada 10 anos, contados a partir do início de sua operação comercial

§ 1º A proposta do método e dos procedimentos a serem utilizados na atualização das curvas cota-área-volume deverá ser encaminhada previamente, pelo concessionário ou autorizado à ANA para avaliação.

§ 2º O concessionário ou autorizado deverá encaminhar à ANA, para avaliação, um relatório técnico detalhado contendo o método e os procedimentos utilizados, bem como as tabelas cota X área e cota X volume, e os respectivos dados eletrônicos e polinômios.

§ 3º Em casos excepcionais, a ANEEL, mediante fundamentação, poderá determinar que a avaliação do processo de assoreamento do reservatório seja realizada com periodicidade inferior a 10 anos. Art. 9º Os dados e informações provenientes das estações hidrométricas e referentes às curvas cota - área - volume, objetos desta Resolução, serão disponibilizados pela ANA via Internet (ANEEL e ANA, 2010).

Em dezembro de 2013, a ANA complementou a Resolução Conjunta mencionada acima, publicando as “Orientações para Atualização das Curvas Cota X Área X Volume” (ANA, 2013), que estabelecem diretrizes técnicas para a realização estudo hidrossedimentológicos, levantamentos topográficos na área seca do reservatório e de levantamentos batimétricos que corresponderá a levantamentos na área que compreende o espelho d’água dos reservatórios, possibilitando a geração da curva CAV com padronização técnica.

Para a elaboração de todos os estudos e levantamentos que servirão de insumo para a criação da curva CAV, diversos fatores devem ser levados em consideração. Conforme as Diretrizes para Atualização da Curva CAV (ANA, 2013) da ANA, os materiais cartográficos dos reservatórios devem ter uma escala mínima de 1:10.000 e obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica Digital da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais Planialtimétrico Classe B, conforme Especificação Técnica de Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) (DSG, 2016).

Para obter as curvas CAV, é necessária uma rede de referência planialtimétrica, estabelecida pela implantação da rede de vértices geodésicos (RVG) para caracterizar o apoio planimétrico e altimétrico. As coordenadas planialtimétricas devem ser obtidas a partir do apoio geodésico planialtimétrico de 1º ordem do IBGE (2017).

Para a amarração altimétrica das cotas ao Sistema Geodésico Brasileiro pode-se realizar a confecção do Modelo Geoidal Local (MGL). O MGL é elaborado com base no comportamento das ondulações geoidais locais, convertendo as coordenadas altimétricas do referencial elipsoidal, conhecidas como altitudes geométricas (h), para altitudes físicas (H). Este modelo é confeccionado de acordo com orientações da ANA (ANA, 2013) de modo a efetuar linhas de nivelamento e contranivelamento entre as Referências de Nível (RRNN) e os marcos que formam a Rede de Vértices Geodésicos (RVG). Este trabalho deve ser executado com um nível digital que registre

automaticamente as medições, minimizando a possibilidade de erros devido a anotações incorretas. É crucial assegurar a precisão dessas linhas de nivelamento, que devem apresentar um fechamento máximo de 3 mm por km no nivelamento duplo, correspondendo a um levantamento de primeira ordem. As orientações da ANA (2013) pedem que para constituição da RVG, é recomendado que pelo menos 20% dos marcos planejados e implantados não sejam utilizados na definição do Modelo Geoidal Local, a fim de garantir a qualidade da sua checagem.

Existem diversas técnicas de levantamento disponíveis para mapear a área seca do reservatório, tais como:

- Topografia convencional
- Levantamento geodésico por meio de GNSS
- Restituição aerofotogramétrica
- Imageamento por satélite
- Interferometria radar
- Perfilamento laser

Para as duas primeiras opções (topografia convencional e GNSS), é necessário apenas realizar o levantamento de detalhes planialtimétricos ao longo da extensão da linha de sondagem batimétrica, estendendo-se até a área seca e até a cota que representa o nível operacional normal.

O modelo digital de elevação pode ser obtido a partir da interpolação desses dados observados em campo. As demais técnicas de levantamento exigem a obtenção de dados de forma contínua em toda a área do reservatório. Portanto, para o levantamento da área seca com essas técnicas, é necessário obter dados em toda a área do reservatório.

O mapeamento da área molhada é realizado por meio de equipamentos específicos, conhecidos como ecobatímetros, podendo ser de feixe único (monofeixe) ou de múltiplos feixes (multifeixe). Quando se utiliza ecobatímetros de feixe único, a área principal, os braços, afluentes e canais do reservatório devem ser mapeados por meio de linhas regulares de sondagem equidistantes e linhas de verificação, dispostas de forma transversal e longitudinal às curvas isobatimétricas da área, respectivamente. As "Orientações para Atualização de Curvas Cota x Área x Volume" (ANA, 2013) estimam o espaçamento entre as seções batimétricas a partir de equações, diferenciando os reservatórios em Usinas Hidrelétricas - UHE e Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH.

Quando realizado com ecobatímetros multifeixe, a distância entre as linhas de sondagem dependerá do tipo de equipamento, da sua capacidade de cobertura, varredura e sobreposição dos dados. É importante destacar que essas linhas devem seguir a direção longitudinal às curvas isobatimétricas da área. É fundamental também que todo o leito do reservatório seja observado, garantindo 100% de cobertura da área.

A partir desses levantamentos, são obtidos o MDT (Modelo Digital de Terreno) e a Curva CAV de um reservatório. Para isso, é necessário integrar dados dos levantamentos como apoio básico e suplementar, MGL, levantamentos da área seca e área molhada.

Esses dados são combinados para geração do MDT que representa a superfície do terreno subaquático desde a cota mínima até a cota da sangria. A partir desse modelo, é possível gerar Curva CAV, e com dados anteriores ou de referência, realizar uma comparação e estimativa de assoreamento e monitoramento do reservatório.

### **3.3. Levantamento Hidrográfico por Métodos Geoacústicos**

Um levantamento hidrográfico tem como uma das principais tarefas o levantamento batimétrico, que consiste em obter as profundidades necessárias para representar o relevo submerso. Essas profundidades podem ser obtidas diretamente, usando prumos de mão, máquinas de sondar e estadias, ou indiretamente, com o uso de ecobatímetros monofeixe e/ou multifeixe (Ferreira et., 2016). Há também uma forte tendência de utilizar o sensoriamento remoto para obter estimativas de profundidades em águas rasas (RIBEIRO et al., 2008; SANTOS et al., 2019) e sistemas de sondagem laser aerotransportados (IHO, 2005).

A batimetria, dentre suas técnicas de aquisição de dados, tem como uma de suas variedades a técnica acústica, amplamente utilizada para investigação de fundos submersos, principalmente devido à ineficiência dos métodos tradicionais de sensoriamento remoto óptico e radar, que sofrem alta atenuação das ondas eletromagnéticas pela água (Ferreira et al., 2017).

Em levantamentos batimétricos, as profundidades são preferencialmente obtidas por meio de sistemas acústicos, como ecobatímetros monofeixe, ecobatímetros multifeixe e sonares interferométricos que são instalados em embarcações (FERREIRA et al., 2022). Para determinados objetivos, existem levantamentos que irão requisitar sistemas com outras configurações de funcionamento como o perfilador sísmico (Subbottom Profilers), sonar de varredura lateral (Sidescan Sonar), Lidar batimétrico, topobatimetria, entre outros.

Todos esses sistemas são usados em conjunto com sistemas diferenciais de posicionamento GNSS (Global Navigation Satellite System) para georreferenciamento das profundidades e, em alguns casos, sensores inerciais para controle da atitude da plataforma de sondagem (IHO, 2005; FERREIRA et al., 2017).

#### **3.3.1. Ecobatímetro monofeixe**

Para a execução da sondagem utilizando sistema monofeixe, é necessário que a área a ser mapeada seja dividida em linhas equidistantes, formando uma malha que orienta o levantamento. Essas linhas são conhecidas como linhas regulares de sondagem e podem ter diferentes orientações, como paralelas, circulares, radiais ou em ziguezague. Para obter curvas isobatimétricas mais precisas, é importante levar em consideração a orientação dessas linhas. Em áreas marítimas ou lagos, as linhas devem ser aproximadamente perpendiculares à costa ou margem, enquanto em rios ou canais, devem ter uma direção perpendicular ao talvegue ou eixo principal (IHO, 2005; DHN, 2017).

O afastamento entre as linhas regulares de sondagem varia de acordo com sistema de aquisição de profundidade utilizado (monofeixe ou multifeixe), tamanho do reservatório, geração de energia (PCH ou UHE) e extensão do reservatório em seu eixo principal (ANA, 2013). Em casos de fundo submerso irregular, essa distância pode ser reduzida para melhor detalhamento.

A ANA (ANA, 2013) sugere as Equações 1 e 2 para a determinação do espaçamento entre as linhas regulares de sondagem, sendo elas Usinas Hidrelétricas (UHE) e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), respectivamente.

$$Est = (0,35 * A^{0.35})/D \quad (1)$$

$$Est = (0,10 * A^{0.25})/D \quad (2)$$

onde:

Est = equidistância horizontal das seções topobatimétricas, em quilômetros;

A = área do reservatório em seu nível operacional normal, em hectares; e

D = extensão do reservatório (corpo principal), em nível operacional normal, em quilômetros.

Para avaliar a qualidade do levantamento, recomenda-se utilizar linhas de verificação que cruzem as linhas regulares de sondagem, preferencialmente em ângulo reto. O intervalo entre as linhas de verificação deve ser de cerca de 3 a 10 vezes o intervalo adotado para as linhas regulares de sondagem (ANA, 2013). Além disso, autores como FERREIRA et al., (2016) e normativas como a NORMAM-25 (DHN, 2017) retratam que a qualidade do levantamento também pode ser avaliada por meio de um balanço de incertezas não correlacionados do sistema de sondagem antes do levantamento, a fim de garantir que o sistema atenda aos requisitos mínimos de qualidade estabelecidos pela normativa.

A Agência Nacional de Águas (ANA, 2013) e a Marinha do Brasil (DHN, 2017) regulamentam o uso do Single Beam Echo Sounder (SBES) no Brasil. Conforme recomendações da International Hydrographic Organization (IHO), a Marinha do Brasil ainda autoriza o uso de sistemas monofeixe em situações específicas, como em levantamentos de Ordem 1b e 2.

### **3.4. Interpoladores**

#### **3.4.1. Topo to Raster**

O Topo to Raster é uma ferramenta de interpolação projetada especificamente para a criação de MDEs hidrologicamente corretos. Esse método é baseado no programa ANUDEM, desenvolvido por HUTCHINSON et, al. (2011). A ferramenta Topo to Raster é amplamente utilizada no ArcGIS devido à sua capacidade de gerar superfícies que respeitam a conectividade de drenagem e a representação correta de cristas e rios a partir de dados de contorno. HUTCHINSON (1991) e ANU Fenner School of Environment and Society and Geoscience Australia (2008) exploram as

aplicações do ANUDEM na produção de MDEs em escala continental. HUTCHINSON (2000) discutem o uso de MDEs na modelagem ambiental.

O processo de interpolação do Topo to Raster utiliza uma técnica de diferenças finitas iterativas, projetada para aproveitar os tipos de dados de entrada comumente disponíveis e as características conhecidas das superfícies de elevação. Essa técnica é otimizada para ter a eficiência computacional de métodos de interpolação locais, como o IDW, sem perder a continuidade da superfície característica de métodos globais, como Krigagem e Spline. Em essência, o Topo to Raster é uma variação discretizada da técnica de spline de placa fina (WAHBA, 1990), onde a penalidade de rugosidade foi modificada para permitir que o MDE gerado siga mudanças abruptas no terreno, como rios, cristas e falésias.

Uma característica fundamental do Topo to Raster é a imposição de uma estrutura de drenagem conectada, o que é crucial, já que a água é a principal força erosiva que molda as paisagens. Isso permite que a ferramenta produza superfícies com maior precisão utilizando menos dados de entrada do que normalmente seria necessário, minimizando os custos de obtenção de MDEs confiáveis. Além disso, essa condição de drenagem praticamente elimina a necessidade de edição ou pós-processamento para remover depressões espúrias na superfície gerada (GOODCHILD, 1987).

No estudo de Carmo (2015), o Topo to Raster foi aplicado junto à Krigagem para a geração de Modelos Digitais de Elevação, onde foi constatada sua eficiência em proporcionar representações acuradas de superfícies submersas.

### **3.4.2. Krigagem**

VIEIRA (2000) apresenta estudo sobre a krigagem e mostra como que o método de Krigagem é amplamente utilizado em geoestatística para interpolar dados espaciais, aproximando valores desconhecidos com base em amostras conhecidas. Este método se diferencia de outras técnicas de interpolação, como a Interpolação Inversa da Distância (IDW) e a interpolação Spline, por ser baseado em modelos estatísticos que incluem a autocorrelação espacial — ou seja, as relações estatísticas entre os pontos medidos.

O princípio fundamental da Krigagem é a suposição de que a distância ou a direção entre pontos amostrais reflete uma correlação espacial que pode ser usada para explicar a variação na superfície. O Kriging ajusta uma função matemática a um número especificado de pontos, ou a todos os pontos dentro de um raio especificado, para determinar o valor de saída para cada localização. Esse processo inclui a análise estatística exploratória dos dados, modelagem de variogramas, criação da superfície de predição e, opcionalmente, a análise de uma superfície de variância. A Krigagem é especialmente apropriada quando há uma correlação espacialmente significativa ou um viés direcional nos dados

A Krigagem é semelhante ao IDW no sentido de que atribui pesos aos valores medidos circundantes para derivar uma predição para um local não medido. No entanto, enquanto no IDW o peso depende unicamente da distância até o local de

predição, na Krigagem os pesos são baseados tanto na distância entre os pontos medidos e o local de predição quanto no arranjo espacial geral dos pontos medidos. A fórmula geral (Equação 3) para ambos os interpoladores é formada como uma soma ponderada dos dados:

$$Z(s_i) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (3)$$

Onde:

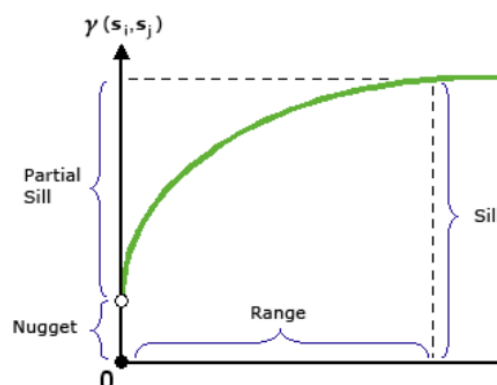
- $Z(s_i)$  = valor medido na localização  $i$ .
- $\lambda_i$  = peso desconhecido para o valor medido na localização  $i$ .
- $s_0$  = localização de predição
- $N$  = número de valores medidos

No método de Krigagem, os pesos  $\lambda_i$  dependem de um modelo ajustado aos pontos medidos, da distância até o local de predição, e das relações espaciais entre os valores medidos ao redor do local de predição. Esse uso do arranjo espacial nos pesos requer que a autocorrelação espacial seja quantificada, o que é feito através da modelagem de variogramas (ESRI, 2024)

O semivariograma (Figura 2) modela a autocorrelação espacial dos pontos amostrais e é descrito por três componentes principais:

- Alcance (Range): Distância em que o modelo de semivariograma se estabiliza, indicando que pontos mais distantes não estão correlacionados.
- Patamar (Sill): Valor no eixo y onde o semivariograma atinge o alcance, representando a variabilidade total dos dados.
- Efeito Pepita (Nugget): Valor no eixo y quando a distância é zero, que pode refletir erros de medição ou variabilidade em escalas menores que a distância de amostragem.

Figura 2 – Semivariograma Krigagem.



Fonte: ESRI (2024).

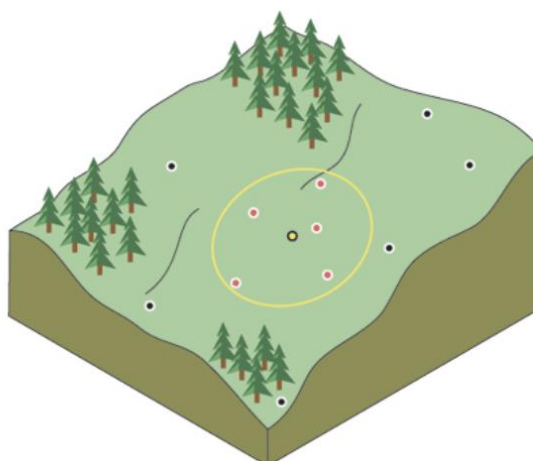
Esses parâmetros são essenciais para garantir que as estimativas produzidas pela Krigagem sejam as mais precisas possíveis (CAMARGO, 1998).

OLIVER (1990) cita alguns métodos de krigagem entre eles a Ordinária e Universal. A Krigagem ordinária é a mais utilizada e assume que a média constante é desconhecida, enquanto a Krigagem universal considera que há uma tendência nos dados, modelada por uma função determinística. A escolha entre esses métodos depende do conhecimento prévio sobre os dados e sobre a presença de tendências espaciais significativas.

### 3.4.3. IDW

A interpolação pelo método Inverse Distance Weighted (IDW) determina os valores das células usando uma combinação ponderada linearmente de um conjunto de pontos amostrais. O peso é uma função da distância inversa, assumindo que a variável sendo mapeada diminui em influência à medida que se afasta do ponto amostral. A Figura 3 mostra o método onde a proximidade dos pontos amostrais influencia diretamente o valor estimado, como na análise de locais para estabelecimentos comerciais, onde o poder de compra de consumidores em locais mais distantes tem menor impacto porque as pessoas tendem a fazer compras mais perto de casa (PHILIP, 1982; WATSON, 1985).

Figura 3 – IDW.



Fonte: ESRI (2024).

Os cálculos do IDW, descritos nas equações 4 e 5, são realizados para determinar o valor de  $u$  em uma dada posição  $x$ , utilizando as amostras  $u_i = u(x_i)$  para  $i=0, 1, \dots, N$ . O peso  $w_i$  é calculado com uma potência  $p > 0$ , onde quanto maior o valor de  $p$ , maior será a influência das amostras mais próximas ao ponto a ser estimado.

$$u(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (4)$$

Onde,

$$w_i = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (5)$$

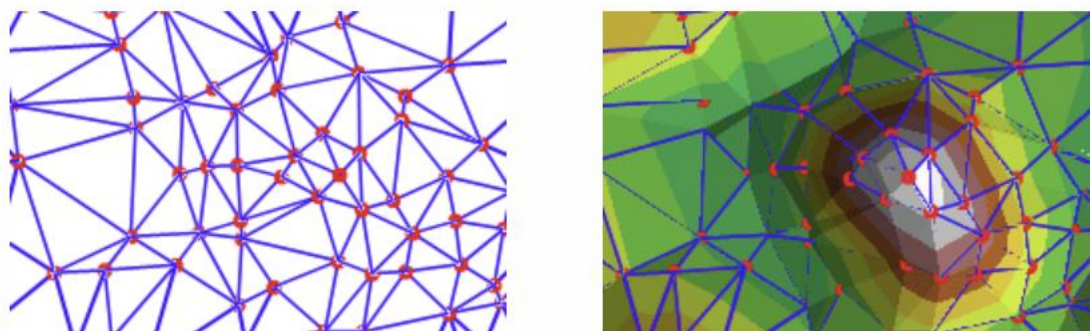
Neste caso,  $d(x, x_i)$  representa a distância entre o ponto  $x$  onde o valor está sendo interpolado e o ponto  $x_i$  onde o valor foi medido. A constante  $p$  é a potência que controla a influência dos pontos amostrais, sendo que potências maiores enfatizam mais os pontos próximos, resultando em uma interpolação mais detalhada, porém menos suave (WATSON & PHILIP, 1985).

#### 3.4.4. TIN

O *Triangulated Irregular Network* (TIN), também conhecida como Triangulação de Delaunay oferece uma visualização geométrica detalhada do terreno, sendo especialmente eficaz na identificação das alterações topográficas causadas pelo acúmulo de sedimentos. Por exemplo, no estudo de Ibrahim et al. (2023), o modelo TIN foi aplicado para mapear a superfície topobatimétrica da Barragem de Tunga, na Nigéria, demonstrando sua capacidade em contextos hidrológicos.

O TIN opera criando superfícies a partir de pontos amostrais que formam triângulos, utilizando os vizinhos mais próximos como base (Figura 4). Para a criação dos novos pontos, é necessário seguir o modelo de triangulação específico deste método.

Figura 4 – TIN.



Fonte: ESRI (2024).

A triangulação procura maximizar o menor ângulo de todos os triângulos formados, garantindo que cada triângulo seja o mais simétrico possível, o que é fundamental para evitar que os triângulos se sobreponham ou que contenham outros pontos dentro de suas circunferências.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Localização e caracterização das áreas de estudo

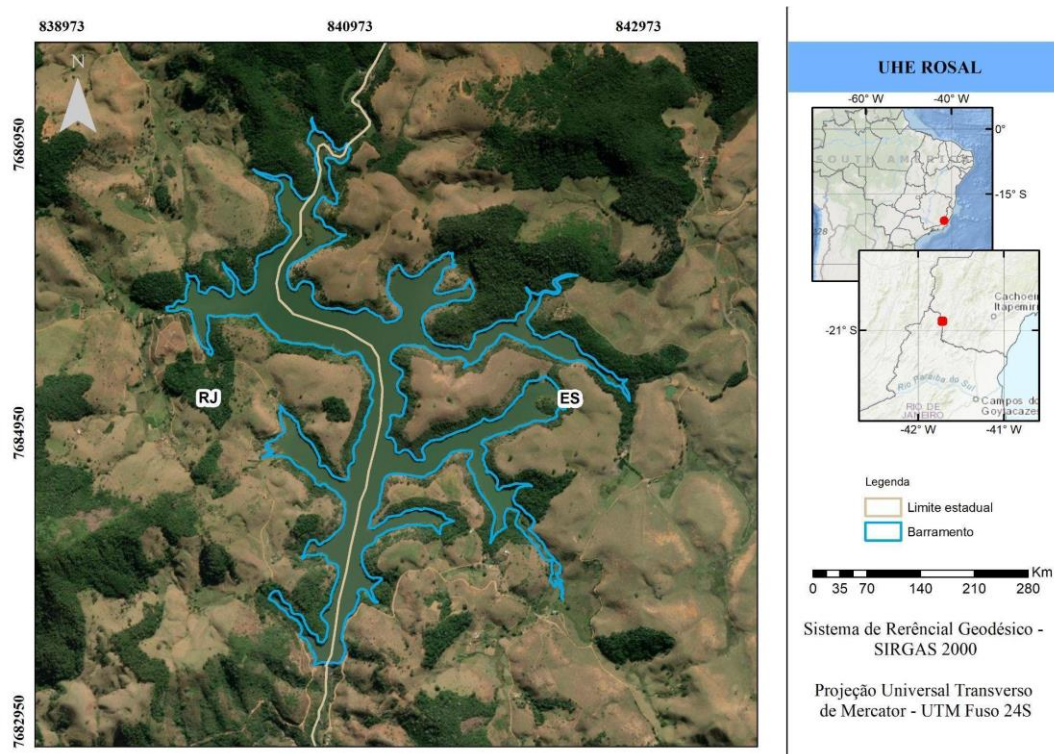
A Usina Hidrelétrica (UHE) Rosal, da Rosal Energia S.A., começou a operar em 1999, com descarga do rio Itabapoana, confrontando os municípios de Guaçuí, no

Espírito Santo, e Bom Jesus do Itabapoana, no Rio de Janeiro. Rosal conta com 2 unidades geradoras totalizando 55 MW de potência instalada.

O barramento é constituído em concreto gravidade, com altura máxima de 40 m e 214,50 m de comprimento de crista. Seu reservatório possui cerca de 1,70 km<sup>2</sup> de área inundada e capacidade máxima de acumulação 17 hm<sup>3</sup>.

A estrutura extravasora da UHE Rosal é composta por um vertedouro de crista livre com soleira em degraus, situado na região central do barramento. Com 55 metros de comprimento e capacidade máxima de descarga de 890 metros cúbicos por segundo, o objetivo do vertedouro é manter uma vazão mínima no trecho de vazão reduzida. Além disso, para esse propósito, há uma válvula dispersora à direita hidráulica do vertedouro. A Casa de Força da UHE Rosal é do tipo abrigada e acomoda duas turbinas do tipo Francis. A vazão turbinada é devolvida diretamente ao rio Itabapoana (CEMIG, 2023). A Figura 5 apresenta a localização do reservatório UHE Rosal.

Figura 5 - Reservatório UHE Rosal.

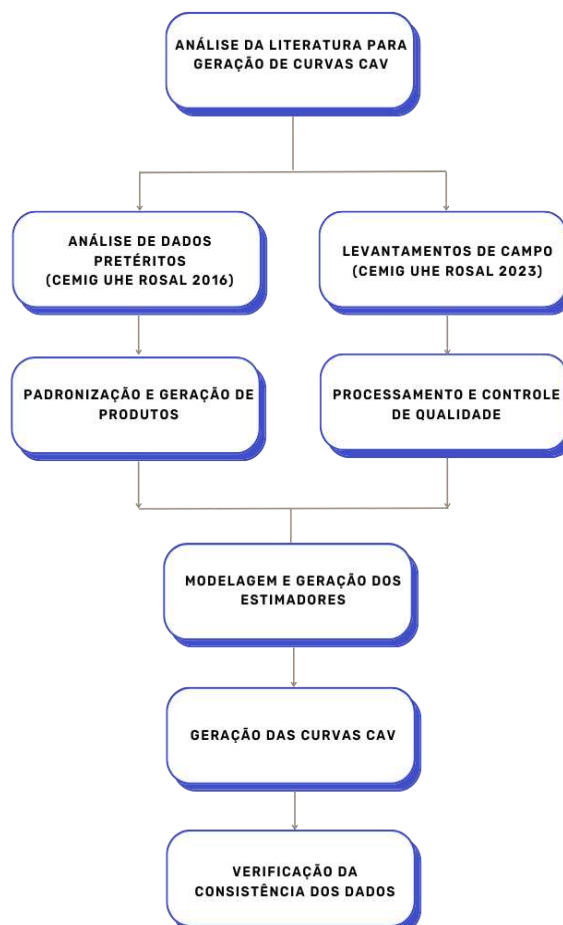


Fonte: Autor (2024).

## 4.2. Metodologia

A metodologia empregada no trabalho é brevemente resumida no fluxograma da Figura 6. Posteriormente, cada etapa de atividades é explicada em detalhes.

Figura 6 - Fluxograma de atividades.



Fonte: Autor (2024).

Este estudo avança na compreensão e estimativa do assoreamento de reservatórios através da geração e análise de curvas Cota x Área x Volume (CAV). O trabalho se inicia com uma análise da literatura existente para identificar as metodologias aplicadas anteriormente e as bases teóricas que sustentam a geração dessas curvas, com o objetivo de estabelecer uma fundação sólida para a pesquisa.

#### 4.2.1. Dados Pretéritos (CEMIG UHE Rosal 2016):

Este segmento do estudo aborda uma análise crítica dos dados históricos, disponíveis no Relatório Técnico "UHE ROSAL ROS-CAV-07-RT-AC01-R02" (CEMIG, 2020). O relatório técnico em questão descreve os processos implementados para a atualização da curva CAV do reservatório UHE Rosal em 2016. Acompanhando este relatório, foi disponibilizada uma base de dados diversificada, composta por

arquivos em formato .shp (shapefile), pontos oriundos do levantamento batimétrico, planilhas de processamento e os dados correspondentes à curva CAV do ano mencionado. Nessa etapa, um controle de qualidade foi aplicado aos arquivos e à planilha fornecidos, com o propósito específico de erradicar quaisquer inconsistências tanto planialtimétricas quanto cartográficas. Esse processo minucioso de verificação assegura que a integridade dos dados não seja apenas preservada, mas também que esteja alinhada com os padrões cartográficos exigidos.

Após a revisão dos dados históricos em formatos vetoriais e tabulares, a pesquisa avançou para a modelagem dos pontos obtidos durante o levantamento batimétrico de 2016. Essa fase se concentra na transformação dos dados de coordenadas UTM (E, N e Altitude Ortométrica) em modelos representativos do relevo submerso do reservatório.

#### **4.2.2. Levantamentos de Campo (CEMIG UHE Rosal 2023):**

Esta pesquisa também buscou a aquisição de dados atualizados com metodologia já prescrita pela ANA na atualização de curva CAV. Assim, prosseguiu-se com a coleta de dados no reservatório de abastecimento de água e geração de energia, utilizando um ecobatímetro monofeixe e adotando o método de posicionamento Real Time Kinematic (RTK). Essa abordagem permitiu a obtenção de pontos do relevo submerso, fundamentais para a modelagem do corpo hídrico e a posterior determinação do volume.

A coleta de dados seguiu diretrizes específicas, conforme estabelecido pelas "Orientações para atualização de curva CAV" propostas pela ANA (2013). Com base nas características do reservatório, como porte, área e orientação norte-sul, definiu-se o espaçamento entre as seções de sondagem a serem realizadas no levantamento batimétrico monofeixe. Foram implementadas linhas regulares de sondagem, perpendiculares ao talvegue, juntamente com linhas de verificação, distanciadas três vezes mais do que as linhas regulares, visando a garantir um controle de qualidade adicional ao processamento dos dados.

Para o planejamento, execução e processamento dos dados, foi adotado o software HYPACK MAX (HYPACK, 2021), proporcionando as ferramentas necessárias para uma análise detalhada e precisa. Após a coleta dos dados, uma análise foi realizada para identificar e remover discrepâncias ou picos encontrados na batimetria. Essa etapa de controle de qualidade é essencial para assegurar a confiabilidade dos dados processados.

O software de processamento realizou a filtragem dos dados e exportou um arquivo de texto contendo as coordenadas planimétricas e as profundidades devidamente processadas. Esses dados foram então utilizados para análises subsequentes, incluindo a conversão das profundidades em altitudes referenciadas ao SGB, conforme orientações da ANA.

#### **4.2.3. Modelagem dos dados batimétricos:**

Seguindo as orientações da Agência Nacional de Águas, inicialmente empregou-se a ferramenta Topo to Raster do software ESRI ArcGIS para a interpolação, uma vez que esta é uma metodologia reconhecida e sugerida pela agência.

Contudo, não se limitando a um único método, a pesquisa expandiu sua análise comparativa empregando outros três interpoladores distintos: IDW, Triangulated Irregular Network (TIN) e a Krigagem Universal. Para cada interpolador, inseriram-se os pontos de sondagem e delimitou-se a borda do reservatório considerando o nível Máximo Operacional (Cota 555 m).

A escolha para os interpoladores teve como critério estudos na literatura em que houvesse foco na interpolação em MDTs referentes à reservatórios e análise de assoreamento em corpos d'água. O Topo to Raster é indicado em estudos na literatura que mostram a eficiência de monitoramento de longo prazo do comportamento sedimentar em bacias hidrográficas brasileiras (Carmo, 2015). Hupp et al. (2013) demonstraram como o IDW é aplicado para identificar dinâmicas sedimentares em corpos d'água, facilitando a identificação de áreas críticas de assoreamento em ambientes fluviais e reservatórios. Adicionalmente, Curtarelli et al. (2015) destacaram a eficácia do IDW na interpolação espacial para mapear a batimetria de um reservatório hidrelétrico na Amazônia, apoiando decisões gerenciais no manejo de recursos hídricos.

Zhang et al. (2014) destacaram a eficácia da Krigagem em ambientes dinâmicos ao aplicá-la para simular a evolução morfológica de longo prazo na costa do Mar Báltico, onde identificaram padrões complexos de deposição e erosão, demonstrando a eficácia da Krigagem em ambientes dinâmicos.

Na fase de comparação dos modelos gerados, foram realizadas análises qualitativas e quantitativas dos MDTs, incluindo uma Análise Exploratória dos dados. Para robustecer essa avaliação, foram utilizados estimadores estatísticos como RMSE, R<sup>2</sup>, MAE e o MAPE.

O RMSE é a raiz quadrada da média dos erros quadrados. Ele fornece uma medida da diferença média entre os valores previstos pelo modelo e os valores observados. Valores menores de RMSE indicam um melhor ajuste do modelo aos dados observados. Para análise dos interpoladores a partir de estimadores como o RMSE, Chai et al. (2014) sugerem que um valor que tende a 0 indica um bom desempenho, apresentando a aproximação entre os dados de referência e os que estão sendo testados. Abaixo é apresentada a equação (Equação 6) que representa essa métrica:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (6)$$

onde n representa o número de amostras, Xi o valor observado,  $\bar{X}_i$  a média dos valores observados e Yi valor predito pelo modelo.

O impacto do RMSE é significativo, pois valores elevados podem indicar a presença de grandes discrepâncias entre os dados previstos e observados, enquanto valores baixos sugerem um modelo que prevê com precisão.

O  $R^2$  (Equação 7) indica a proporção da variabilidade dos dados que é explicada pelo modelo. Este estimador varia entre 0 e 1, onde 1 indica um modelo perfeito, ou seja, onde todos os pontos de dados se encontram exatamente na linha de regressão.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

Onde:

- $n$  é o número de observações
- $y_i$  são os valores observados
- $\hat{y}_i$  são os valores previstos pelo modelo
- $\bar{y}$  é a média dos valores observados

Um valor de  $R^2$  mais próximo de 1 indica que o modelo consegue explicar a maior parte da variabilidade da variável dependente em relação às variáveis independentes. James (2013) explica que o coeficiente de determinação  $R^2$  avalia a precisão das previsões do modelo em comparação com os valores reais. O objetivo é alcançar um  $R^2$  próximo de 1, sendo que valores acima de 0,9 geralmente indicam uma modelagem eficaz.

O MAE é a média dos erros absolutos entre os valores previstos e os valores observados. Diferente do RMSE, o MAE não penaliza tanto as maiores discrepâncias, proporcionando uma medida mais direta da magnitude média dos erros.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \quad (7)$$

onde  $n$  representa o número de amostras,  $X_i$  o valor observado,  $\bar{X}_i$  a média dos valores observados e  $Y_i$  valor predito pelo modelo.

Valores mais baixos de MAE representam uma melhor acurácia do modelo, refletindo previsões que estão mais próximas dos valores reais. Chai et al. (2014) explica que valores mais baixos de MAE representam uma acurácia melhor.

Por fim, utilizado por Santos et al., (2020) o Erro Médio Absoluto Percentual (MAPE) é uma métrica utilizada para avaliar a precisão de modelos de previsão, expressando o erro como uma porcentagem em relação aos valores reais. O MAPE calcula a média dos erros absolutos, divididos pelos valores reais, e multiplica o resultado por 100 para ser expresso em termos percentuais. Isso torna o MAPE particularmente útil para interpretar o erro relativo entre os valores previstos e observados, independentemente da escala dos dados.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|X_i - Y_i|}{X_i} \right) * 100 \quad (7)$$

onde n representa o número de amostras,  $X_i$  o valor observado,  $\bar{X}_i$  a média dos valores observados e  $Y_i$  valor predito pelo modelo.

Um MAPE menor indica um modelo mais preciso, enquanto valores mais elevados sugerem maiores discrepâncias entre as previsões e os valores reais. No contexto da interpolação de cotas batimétricas, o MAPE oferece uma maneira clara de avaliar o quão próximas as estimativas estão dos dados observados, ajudando a comparar a eficácia de diferentes interpoladores.

#### 4.2.4. Curvas Cota x Área x Volume:

Posteriormente, com base nos MDTs produzidos, foram confeccionadas as curvas CAV. Nesta etapa, utilizou-se o plugin "CAV", desenvolvido em Python e disponibilizado no repositório do QGIS. Este plugin foi desenvolvido pela equipe da UFV no âmbito do Termo de Execução Descentralizada: Execução dos serviços topográficos, batimétricos e hidrossedimentológicos para a atualização e correção das curvas Cota x Área x Volume – CAV nos reservatórios de acumulação de água, no trecho V do Eixo Leste e trechos I e II do Eixo Norte, implantados no âmbito do Projeto de Integração do Rio São Francisco – PISF, compreendidos nos estados do Ceará (CE), Paraíba (PB), Pernambuco (PE) e do Rio Grande do Norte (RN). Outras ferramentas automatizadas também foram desenvolvidas, como por exemplo, plugin para planejamento de linhas de sondagem e plugin para análise da qualidade vertical da batimetria.

Como princípio básico, o plugin CAV processa arquivos shapefile e raster para calcular o volume e a área por cota de cada reservatório. Ele gera um relatório detalhado que inclui as curvas CAV, sobreposições visuais e um arquivo raster destacando as diferenças entre os modelos, proporcionando uma representação espacial do fenômeno estudado.

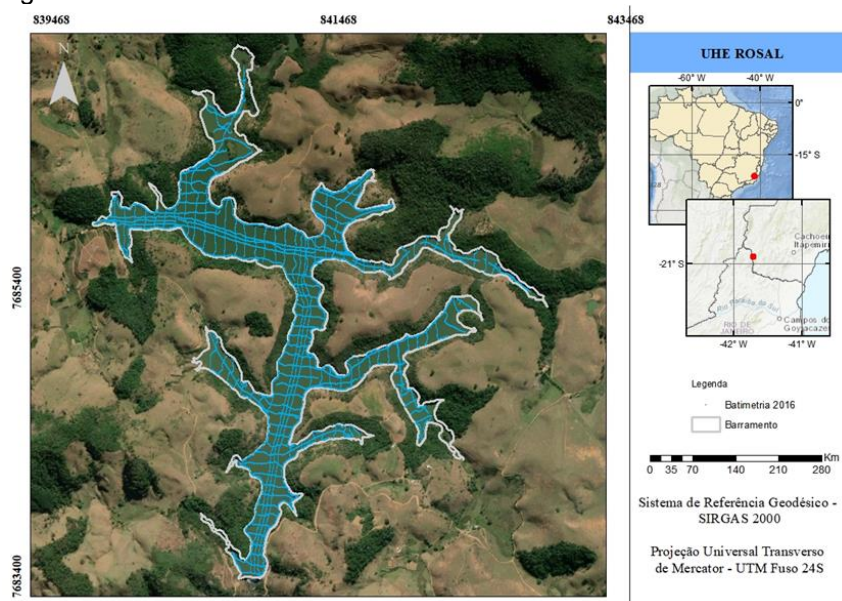
Por fim, após a análise dos dados gerados pelos MDTs, discute-se a viabilidade do uso de interpoladores alternativos ao método Topo To Raster, bem como a eficácia de diferentes estimadores. Com o auxílio do "CAV", as curvas CAV são geradas de modo automatizado, proporcionando uma visualização clara das variações de volume e área por cota.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Aquisição dos dados batimétricos

Com os dados fornecidos pela CEMIG, procedeu-se a organização dos dados e verificação de integridade. A Figura 7 ilustra as linhas executadas no levantamento batimétrico realizado no reservatório em 2016.

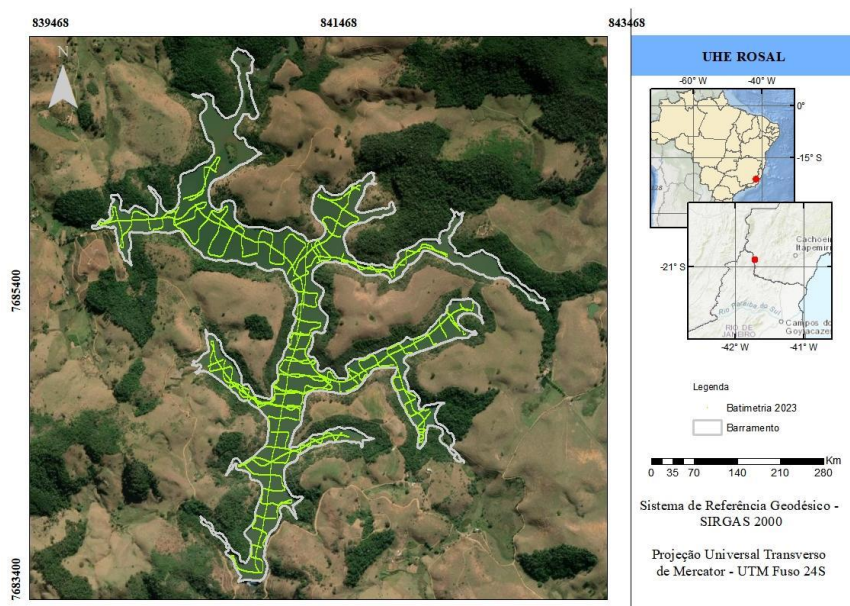
Figura 7 - Levantamento batimétrico realizado em 2016 na UHE ROSAL.



Fonte: Autor (2024).

A batimetria de 2023 foi executada no reservatório UHE Rosal, utilizando tecnologia monofeixe alinhada às normativas da ANA (ANA, 2013). A Figura 8 apresenta a execução das linhas de sondagem, que se estendem longitudinal e transversalmente, cobrindo integralmente o reservatório. Como citado na metodologia, todo o levantamento foi orientado pelas "Orientações para atualização de curva CAV" da ANA (ANA, 2013).

Figura 8 - Levantamento batimétrico realizado em 2023 na UHE ROSAL.



Fonte: Autor (2024).

É possível observar em ambos os dados, que a execução do levantamento seguiu o planejamento de linhas longitudinais e transversais pelo reservatório buscando a cobertura de todo o corpo principal, bem como os braços e regiões de distribuição. Em 2016, a batimetria apresenta 57,37 km de linhas levantadas, com uma taxa de amostragem média de 2 metros entre os pontos. Por outro lado, em 2023, a batimetria executada tem como resultado 33,28 km em linhas de sondagem, com uma taxa média de amostragem de 0,5 metros.

Vale notar que a falta de dados em alguns braços do reservatório (braços ao norte e ao nordeste) comprometiam a segurança à navegação, e conseqüentemente impossibilitando a coleta de dados, fazendo-se possível apenas coleta de dados no restante do reservatório.

Adicionalmente, optou-se então em comparar apenas a área molhada do reservatório, uma vez que para 2016 os dados da área seca são provenientes de mapeamento a Laser (LiDAR), e para esse estudo tornou-se inviável a aquisição da mesma tecnologia para comparação. Então os valores a serem comparados foram limitados à cota máxima operacional do reservatório.

## 5.2. Processamento e Controle de Qualidade dos dados

Após a disponibilização dos dados pela CEMIG, para 2016, foi realizada a organização de uma base de dados com arquivos de linhas, pontos de batimetria e arquivos TIF, além do relatório técnico.

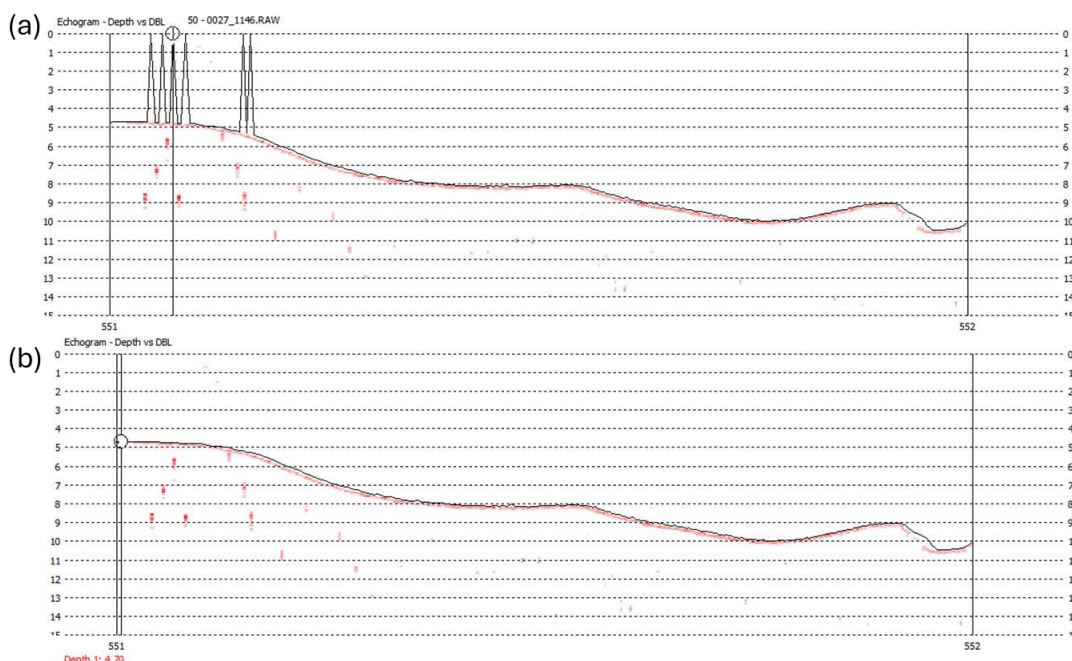
Para 2023 o processamento demandou mais etapas, nesse caso, como o levantamento foi realizado para o presente estudo, toda a parte de tratamento dos dados precisou ser feita desde a coleta. Assim, de posse dos dados batimétricos iniciou-se com o processamento no software Hypack. A primeira etapa foi a verificação

da ocorrência de buracos ('gaps') na área sondada, analisando-se manualmente os arquivos brutos (.raw). Algumas áreas do tipo foram encontradas, justificadas principalmente pelo nível d'água no dia do levantamento, onde algumas regiões do reservatório, com a presença de paliteiros, impossibilitou a navegação segura da embarcação, limitando o levantamento em alguns pontos.

Posteriormente, as profundidades foram ajustadas ao nível d'água de referência local do reservatório, com base no levantamento do nível d'água, realizado a partir de uma redução ponto a ponto, onde a diferença do NA encontrado na coleta fosse derivado ao NA mensurado pelo sistema de régua do. Como não houve variações significativas no nível d'água durante o levantamento, adotou-se o NA operacional do dia como cota média do espelho água do dia. Também foram monitoradas variações de cota ao longo da margem através de um levantamento topográfico, mas não houve diferenças significativas que afetassem os cálculos de profundidade.

O processamento continuou com a edição das linhas sondadas no módulo editing do Hypack, onde se retiraram profundidades espúrias (spikes) e erros de posicionamento. A Figura 9 apresenta dois perfis referentes ao levantamento, o primeiro a presença de spikes e o segundo com o tratamento realizado.

Figura 9 - Levantamento batimétrico realizado em 2023 na UHE ROSAL.



Fonte: Autor (2024).

Esse processo permitiu a visualização e edição da navegação percorrida pela embarcação. A análise das linhas sondadas comparou a precisão do levantamento através de cruzamentos de linhas de sondagem regulares e de verificação. Essa análise foi feita no módulo Cross Statistics do Hypack, gerando índices estatísticos para estimar a precisão do levantamento (Tabela 1).

Tabela 1 – Análise de interseções batimetrias.

	Pontos de interseção	Validação cruzada (m)		
		Mínima	Média	Máxima
Batimetria 2016	214	-0,504	0,060	0,544
Batimetria 2023	138	-0,415	-0,047	0,382

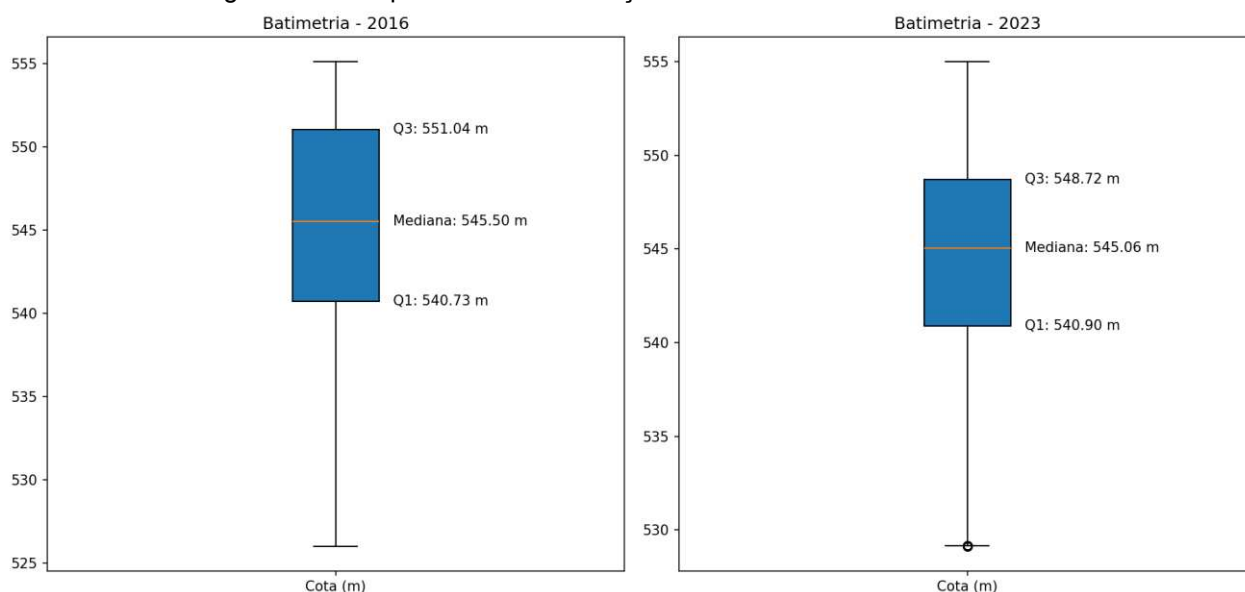
Fonte: Autor (2024).

O resultado do processamento e controle de qualidade para a precisão dos levantamentos são apresentados na comparação entre as interseções geradas com o cruzamento das linhas do levantamento. Visto que os levantamentos não excederam aproximadamente 60 centímetros de incerteza entre as cotas analisadas.

### 5.3. Modelagem e Interpolação

Conforme mencionado anteriormente, a partir dos dados coletados no levantamento batimétrico, foram gerados MDTs utilizando quatro diferentes métodos de interpolação: Topo To Raster, IDW, Krigagem e TIN. A Figura 10 apresenta uma análise exploratória das bases de dados utilizadas para a modelagem, destacando as distribuições das cotas em cada conjunto de dados

Figura 10 – Boxplot com as informações obtidas em cada batimetria.



Fonte: Autor (2024).

Os boxplots das cotas referentes aos anos de 2016 e 2023 apresentam uma mediana de 545,50 m e 545,06 m, respectivamente, indicando uma leve variação entre os dois períodos. Em relação ao intervalo interquartil (IQR), que abrange os valores entre o primeiro quartil (Q1) e o terceiro quartil (Q3), observa-se que em 2016 o Q1 é de 540,73 m e o Q3 é de 551,04 m, enquanto em 2023 o Q1 é de 540,90 m e o Q3 é de 548,72 m.

Dessa forma, com o processamento dos dados e análise feita nos levantamentos batimétricos realizados, progrediu-se para as próximas etapas do trabalho que foi o estudo em cima das modelagens.

Para garantir a validação dos modelos gerados a partir dos dados batimétricos, foi realizada a divisão dos dados em dois conjuntos. Inicialmente, 95% dos dados de cada conjunto foram utilizados para o treinamento dos modelos, enquanto 5% dos dados foram reservados de forma aleatória para verificação. Essa divisão garante que os pontos de validação não sejam utilizados durante o processo de modelagem, permitindo uma avaliação objetiva e independente da precisão dos modelos gerados.

Prosseguindo, foram aplicados quatro métodos de interpolação — Topo To Raster, IDW, Krigagem e TIN — para gerar os Modelos Digitais de Terreno (MDTs) com base nos 95% dos dados disponíveis. Para a modelagem referente ao ano de 2016, foram utilizados 34.987 pontos batimétricos, enquanto para 2023 foram utilizados 63.001 pontos.

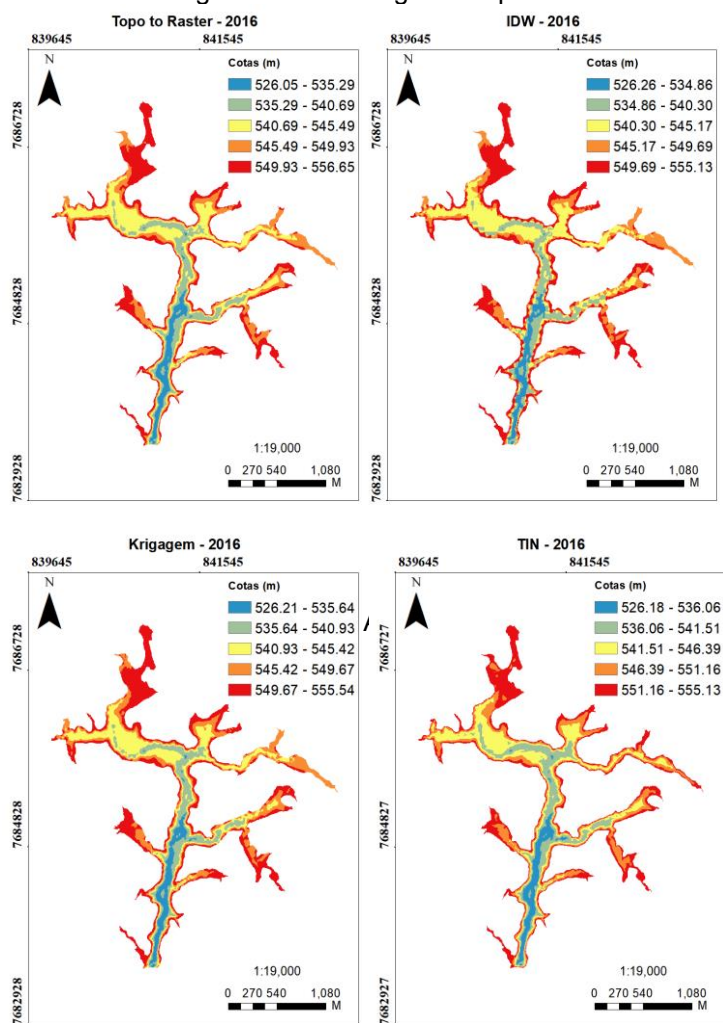
O Topo to Raster foi executado no ArcGIS, com os pontos batimétricos inseridos como '*point elevation*', sendo o campo de cota a referência altimétrica para a interpolação, delimitada pelo contorno do reservatório. No caso do IDW, o modelo foi gerado no mesmo software, utilizando os mesmos dados de entrada. Não houve alteração nos parâmetros padrão da ferramenta.

A Krigagem também utilizou os pontos e o limite do reservatório como insumos, porém, durante a modelagem, alguns parâmetros geoestatísticos foram ajustados. Para os modelos, o ArcGIS também foi utilizado, com resultados: modelo esférico, em 2016, o alcance obtido foi de 169,96 m, com patamar de 40,05 m e efeito pepita de 0,001 m<sup>2</sup>. Para os pontos de 2023, os resultados da krigagem: alcance obtido foi de 232,29 m, com patamar de 30,70 m<sup>2</sup> e efeito pepita de 0,001 m<sup>2</sup>. Com base nesses ajustes, os modelos finais foram gerados para os dois anos.

Por fim, o TIN foi construído utilizando os mesmos dados de entrada e com parâmetros padrão, no formato padrão do software. Todos os modelos foram gerados com uma resolução de 1 metro.

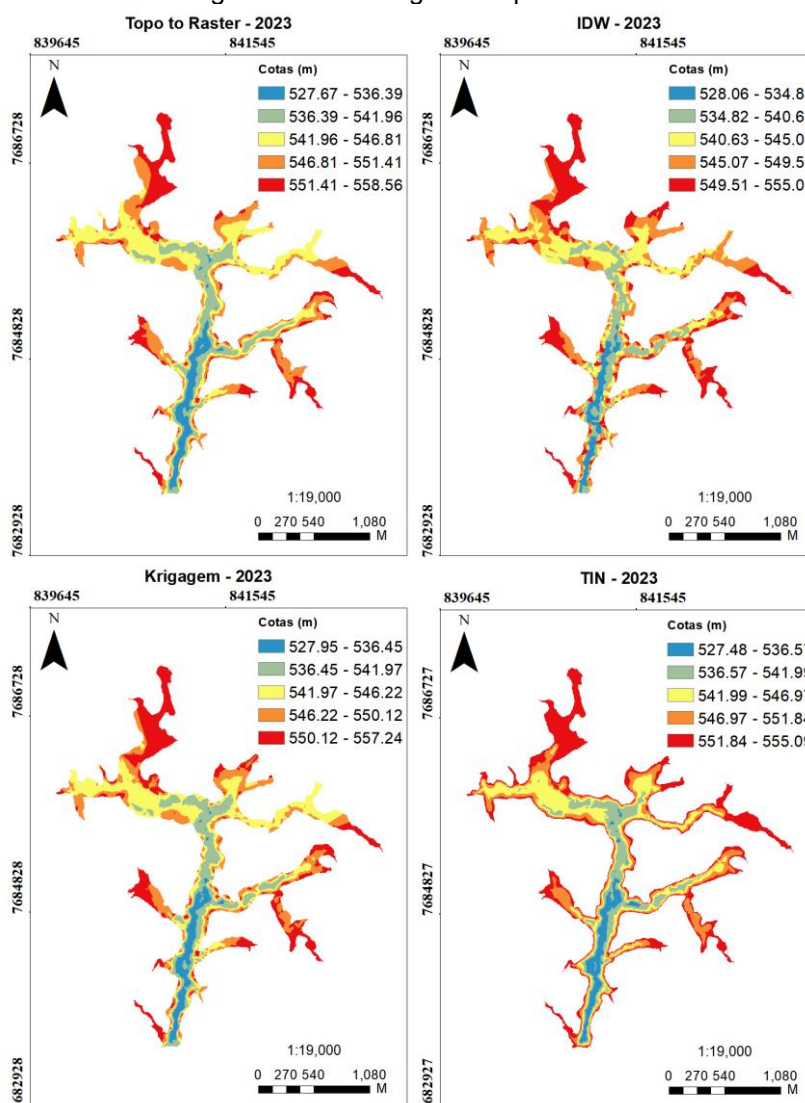
As Figuras 11 e 12 apresentam os resultados gerados por cada interpolador e para cada base de dados. Os modelos foram plotados com intervalos entre as cotas, permitindo a comparação entre as Cotas Máximas e Cotas Mínimas para os dois anos modelados.

Figura 11 – MDTs gerados para 2016.



Sistema de Referência Geodésico – SIRGAS2000  
 Sistema de Projeção Universal de Mercator – UTM 24S

Figura 12 – MDTs gerados para 2023



Sistema de Referência Geodésico – SIRGAS2000  
 Sistema de Projeção Universal de Mercator – UTM 24S  
 Fonte: Autor (2024).

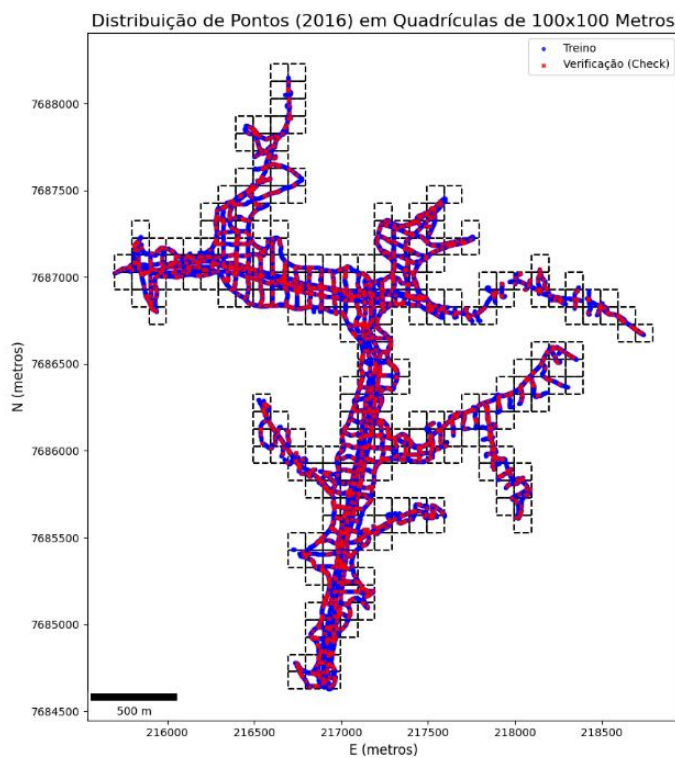
Nas representações nota-se o comportamento de cada um dos interpoladores através da classificação das cotas em seus intervalos. Para 2016 (Figura 11) é possível notar que o Topo to Raster tem uma diferença entre sua cota mínima e máxima de 30,6 metros. Em contrapartida tem seus valores de 28,87 metros; 29,33 metros e 28,95 metros para IDW, Krigagem e TIN, respectivamente.

Nos dados de 2023, os valores encontrados foram 37,29 metros no Topo to Raster; 26,95 metros no IDW; 29,29 metros na Krigagem e 27,61 metros no TIN.

Para comparar os valores estimados pelos modelos com os valores observados, os dados foram divididos em quadrículas de 100x100 metros (Figuras 13 e 14), garantindo-se que cada quadrícula contivesse pelo menos 50 pontos. Com isso, foi possível retirar 5% dos pontos para validação, assegurando uma quantidade mínima de dados em cada quadrícula. Esse ponto de atenção garantiu uma

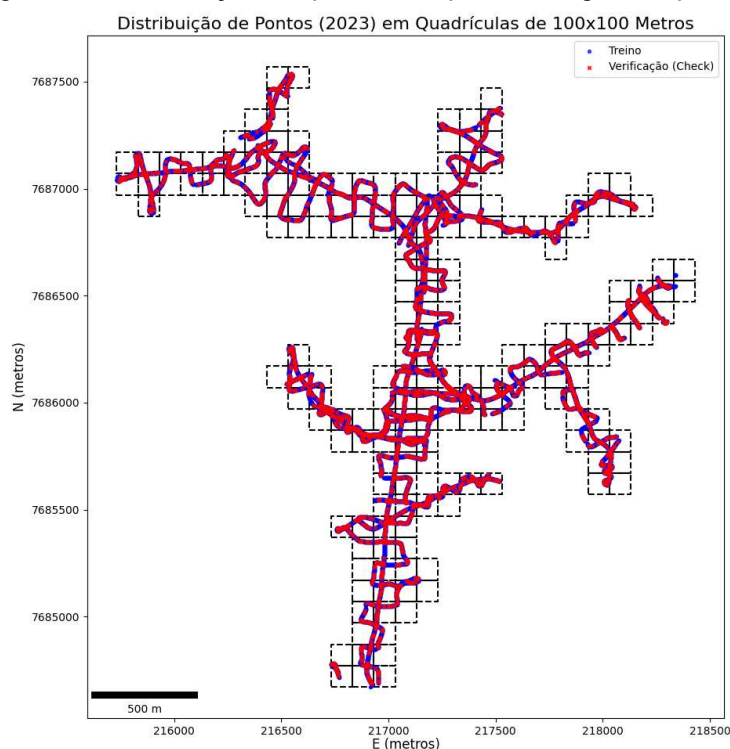
distribuição mais uniforme dos pontos de validação e preservou a aleatoriedade na seleção das amostras para checagem. No total, 1932 amostras de 2016 e 3361 amostras de 2023 foram reservadas para checagem nos modelos que seriam gerados com os outros 95% dos pontos da amostra.

Figura 13 – Distribuição de quadrículas para checagem de pontos de 2016



Fonte: Autor (2024).

Figura 14 – Distribuição de quadrículas para checagem de pontos de 2023



Após a seleção dos pontos de checagem, o código aplicou as mesmas coordenadas desses pontos sobre o modelo interpolado para extrair a altitude correspondente em cada pixel. Com essas altitudes extraídas, foi possível comparar diretamente os valores estimados pelos interpoladores com as altitudes reais registradas na batimetria. A diferença entre as cotas previstas pelo modelo e as cotas de referência foi então calculada para cada ponto de checagem. Com base nessas diferenças, foram geradas as estatísticas de validação, como o MAE, o RMSE e outras métricas que avaliam a precisão dos modelos, destacando as áreas onde as previsões se mostraram mais ou menos precisas em relação aos dados reais.

A Tabela 2 apresenta os resultados da validação do modelo, utilizando métricas como RMSE,  $R^2$ , MAE e MAPE, além de estatísticas descritivas das diferenças entre os valores reais e estimados, como a diferença média, mínima, máxima, e o desvio padrão. Essas métricas proporcionam uma visão detalhada da precisão e acurácia das previsões dos interpoladores. O RMSE e o MAE quantificam a magnitude média dos erros, enquanto o  $R^2$  indica o grau de explicação da variabilidade dos dados pelo modelo. O MAPE, por sua vez, expressa o erro médio absoluto em termos percentuais, facilitando a interpretação do desempenho do modelo, independentemente da escala dos dados. Um MAPE baixo sugere que o interpolador é capaz de prever as cotas com alta precisão, com erros percentuais mínimos em relação aos valores reais. As estatísticas descritivas complementam essa análise ao fornecer informações sobre a dispersão e amplitude dos erros entre as previsões e as observações.

Tabela 2 – Estimadores dos interpoladores.

ESTIMADORES	Topo To Raster		IDW		Krigagem		TIN	
	2016	2023	2016	2023	2016	2023	2016	2023
RMSE (m)	0,29	0,16	0,30	0,13	0,55	0,19	0,19	0,14
R <sup>2</sup> (m)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
MAE (m)	0,12	0,08	0,15	0,07	0,30	0,10	0,11	0,09
MAPE	0,02%	0,02%	0,03%	0,01%	0,06%	0,02%	0,02%	0,02%
Dif. Média (m)	-0,005	0,001	-0,011	-0,001	-0,011	-0,001	-0,007	-0,003
Desvio Padrão (m)	0,286	0,155	0,298	0,126	0,548	0,188	0,189	0,138
Dif. Mín (m)	-7,536	-2,531	-6,71	-1,253	-9,775	-3,243	-1,734	-1,125
Dif. Máx (m)	1,817	1,539	1,714	1,410	2,851	2,119	1,774	1,327

Fonte: Autor (2024).

Ao analisar as estatísticas descritivas dos interpoladores de forma independente para cada ano, observa-se que o comportamento dos estimadores reflete a capacidade dos interpoladores em prever as cotas de maneira consistente e precisa dentro do contexto de cada conjunto de dados.

Para o ano de 2016, a diferença média próxima de zero em todos os interpoladores indica que, de forma geral, não houve uma tendência consistente de superestimação ou subestimação das cotas previstas. No entanto, o desvio padrão revela diferenças importantes entre os métodos. A Krigagem, com um desvio padrão de 0,548 m, apresenta uma maior variabilidade nos erros, sugerindo que esse interpolador teve dificuldades em produzir previsões homogêneas e consistentes ao longo do conjunto de dados de 2016. O Topo To Raster e o TIN, por outro lado, apresentam desvios padrão menores, indicando uma maior consistência nas previsões.

Ao observar os valores extremos de diferença mínima e máxima em 2016, a Krigagem apresenta as maiores informações, tanto em subestimação (-9,775 m) quanto em superestimação (2,851 m). O TIN, por sua vez, apresenta os menores erros extremos, com uma diferença mínima de -1,734 m e máxima de 1,774 m, destacando-se como um método mais estável para este ano, especialmente quando a prioridade é evitar grandes desvios em pontos específicos.

Em relação ao ano de 2023, a análise revela um comportamento similar no que diz respeito à ausência de viés sistemático nas previsões, com diferenças médias próximas de zero para todos os interpoladores. O desvio padrão indica uma redução da variabilidade dos erros dentro do conjunto de dados de 2023, sugerindo que os interpoladores conseguiram gerar previsões que condizem com a amostra. A Krigagem, apesar de ainda apresentar a maior variabilidade com desvio padrão de 0,188 m, demonstra um desempenho mais consistente em relação aos outros interpoladores. O TIN e o Topo To Raster se destacam por sua baixa variabilidade, com desvios padrão de 0,138 m e 0,155 m, respectivamente.

Os valores extremos em 2023 mostram um comportamento onde a Krigagem continua apresentando as maiores diferenças, mas com uma diferença mínima de -3,243 m e máxima de 2,119 m, ainda destacando uma dificuldade desse interpolador em lidar com valores extremos. O TIN novamente se mostra o interpolador mais estável, com os menores extremos com -1,125 m e 1,327 m, indicando que este método é eficiente em prever cotas sem grandes desvios.

Portanto, ao analisar os dois anos de forma independente, é possível observar que cada interpolador apresenta comportamentos distintos, adaptando-se de diferentes maneiras ao conjunto de dados específico de cada ano. A Krigagem é o interpolador que mais apresenta variabilidade e extremos, sugerindo uma menor precisão nas previsões, enquanto o TIN e o Topo To Raster se mostraram mais estáveis em suas estatísticas. Entretanto, é importante lembrar que esses resultados não dependem apenas do interpolador em si, mas também de fatores externos como a técnica do levantamento realizado, a precisão da navegação, a taxa de aquisição das profundidades, densidade de amostragem, entre outros. Esses elementos podem influenciar diretamente o desempenho de cada interpolador, fazendo com que a qualidade dos dados coletados tenha um impacto crucial nas previsões geradas. Dessa forma, a adequação de cada interpolador deve ser avaliada considerando também essas variáveis externas que fazem parte do processo de levantamento dos dados.

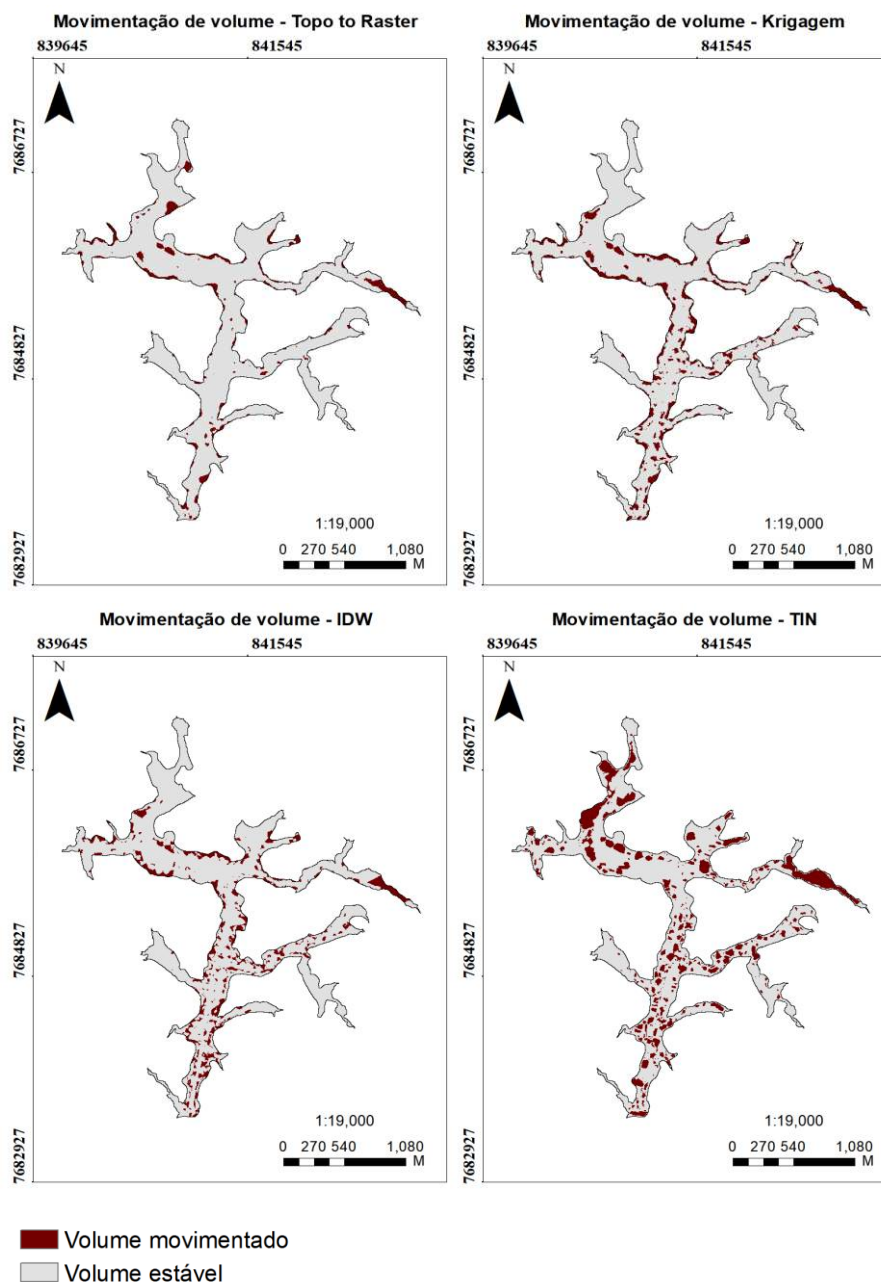
#### **5.4. Análise do assoreamento**

O presente estudo também buscou compreender o assoreamento ocorrido no período entre 2016 e 2023, utilizando uma abordagem quantitativa por meio da análise de modelos da diferença de cotas entre os anos referentes a cada base de dados. Esses modelos foram gerados pelos interpoladores Topo to Raster, Krigagem, IDW e TIN, com o objetivo de avaliar as alterações topográficas no reservatório. A diferença considerada neste estudo é calculada como a subtração entre os valores do MDT de 2023 e os valores dos MDTs obtidos em 2016, para cada interpolador.

Para esclarecer, a referência utilizada é o MDT de 2016, contra o qual as alterações topográficas de 2023 foram comparadas. Esse método de comparação identifica tanto o acúmulo quanto a erosão de sedimentos, onde valores negativos indicam áreas onde houve aumento de elevação devido ao acúmulo de sedimentos, enquanto valores positivos indicam áreas onde houve erosão ou remoção de material.

Essa análise possibilitou a espacialização do assoreamento ao comparar os MDTs de 2016 e 2023 (Figura 15). A cor cinza representa regiões em que a diferença entre os modelos não excedeu a diferença 1 metro (resolução espacial do MDT) entre si, enquanto as outras áreas representam maiores diferenças entre os modelos, refletindo então um aumento ou diminuição do volume. Esse valor foi escolhido por ser a precisão do modelo, possibilitando assim, uma comparação mais condizente nível de detalhamento gerado pelas interpolações.

Figura 15 – Diferença de MDTs



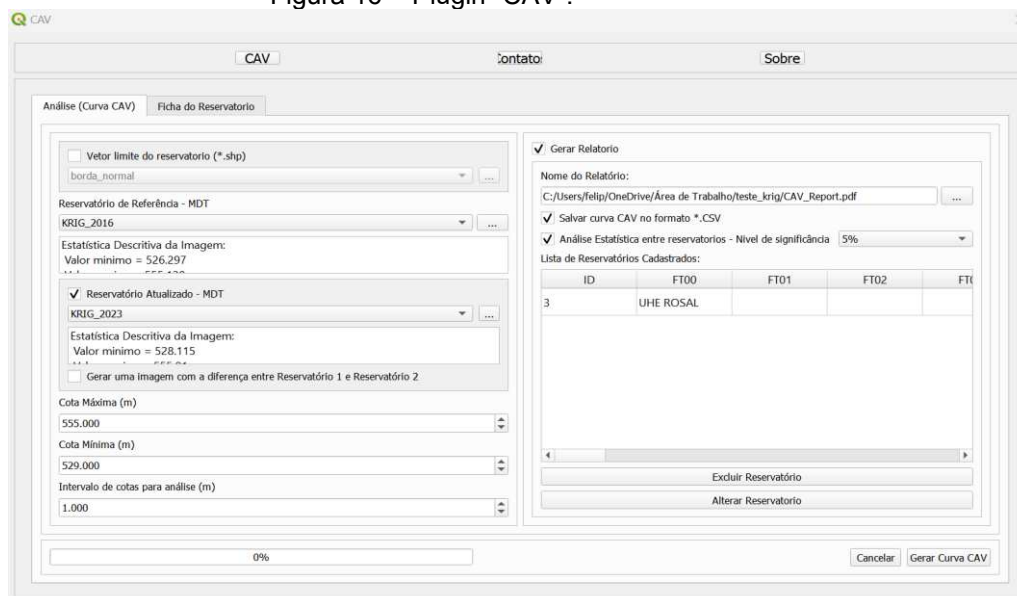
Fonte: Autor (2024).

Com a comparação dos modelos, foi possível visualizar uma diferença de comportamento, que pode refletir no cálculo de volume. Assim, para o Topo to Raster foi possível notar em sua grande parte, uma estabilidade na diferença dos modelos, apresentando pequenas áreas de volume movimentado. Para Krigagem e IDW, é percebido a semelhança em suas representações. Por outro lado, o TIN mostra maiores diferenças entre seus modelos.

De forma geral, os modelos gerados para Topo to Raster, Krigagem e IDW, a partir de uma análise visual, apresentam comportamentos muito semelhantes representando a realidade da sedimentação de reservatórios e barragens, onde a movimentação sedimentar ocorre na região das bordas e em pontos no curso d'água. O TIN por outro lado, apresentou uma discrepância para com os outros modelos, não apresentando nas bordas o assoreamento notado nos outros modelos.

Para complementar a análise, dados numéricos devem ser discutidos. Desta forma prosseguiu-se à geração das curvas CAV dos modelos. As confecções das curvas foram realizadas no plugin CAV. A Figura 16 ilustra o GUI (interface gráfica de usuário) do plugin em questão. Salienta-se que, conforme prerrogativas do financiador do projeto que gerou este plugin, seu uso é permitido e livre.

Figura 16 – Plugin “CAV”.



Fonte: Autor (2024).

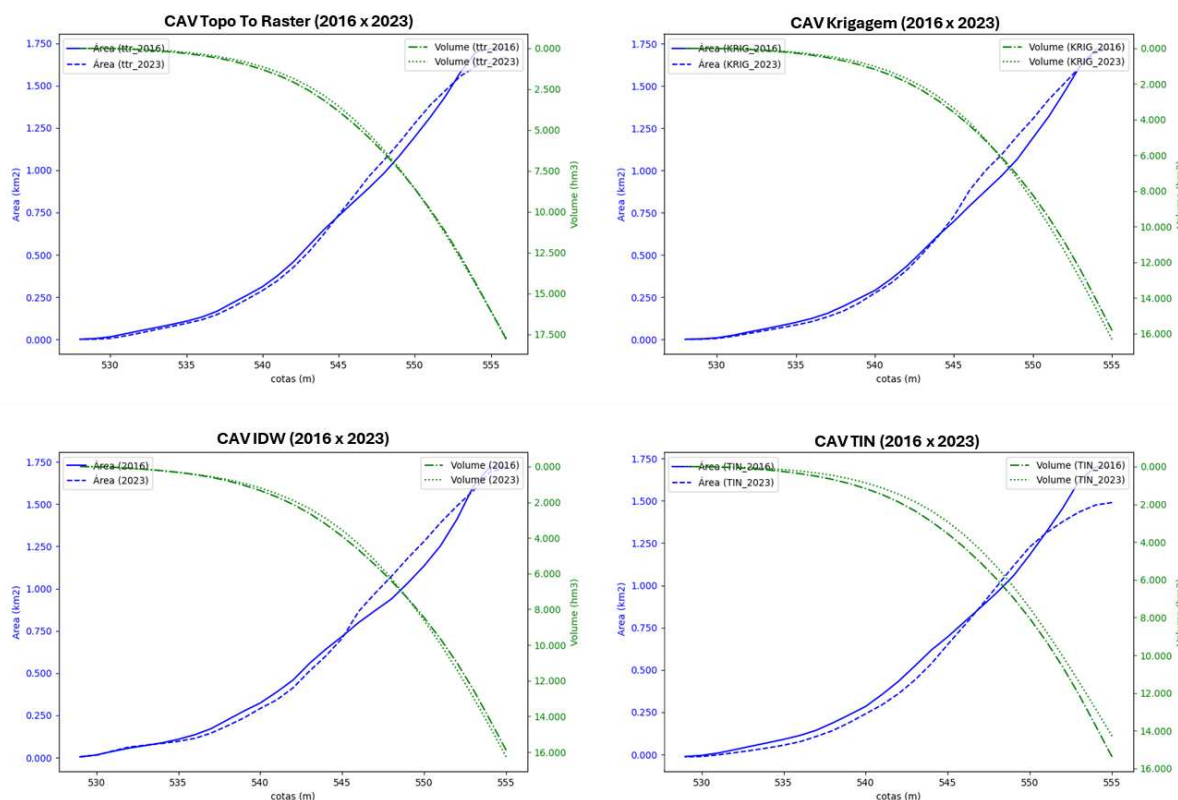
No uso do plugin, o usuário pode inserir um vetor de borda para delimitar a área de estudo do assoreamento. Em seguida, são carregados os modelos digitais de terreno de referência e o modelo a ser analisado. O plugin também suporta a inclusão de dados cadastrais do reservatório conforme exigido pela ANA em suas entregas técnicas e fichas de cadastramento.

Com a inserção dos arquivos no plugin, o usuário deve especificar um caminho para a saída do relatório de processamento. Para a análise, os modelos digitais de terreno referentes aos anos de 2016 e 2023 foram comparados, utilizando diferentes interpoladores. Este procedimento visa avaliar o comportamento da curva CAV ao longo do período estudado bem como os volumes de cada um dos métodos.

A Figura 17, apresenta de acordo com as inserções no plugin as curvas CAV, nelas, as linhas contínuas em cor azul representam os dados de área de 2016, em cor verde e com configuração traço-ponto, o volume de 2016. As linhas pontilhadas em azul representam os dados de área de 2023 e em cor verde mas com configuração pontilhada, o volume do ano. A variação entre os pares de linhas, portanto, indica a mudança na relação área-volume ao longo do tempo, fornecendo uma indicação visual do assoreamento.

Em cada gráfico, há uma comparação entre os dois anos, e os interpoladores, que agora estão sendo analisados a partir das variáveis de área e volume por cota.

Figura 17 – Curvas CAV.



Fonte: Autor (2024).

O eixo horizontal representa as cotas em metros, enquanto os eixos verticais esquerdos e direitos representam, respectivamente, a área em quilômetros quadrados ( $\text{km}^2$ ) e o volume em hectômetros cúbicos ( $\text{hm}^3$ ). Pode-se observar diferenças entre as áreas e volumes calculados pelos diferentes interpoladores, indicando variações na estimativa do assoreamento.

Através da análise visual dos gráficos de Curvas CAV, identifica-se um padrão comportamental consistente entre os diferentes interpoladores utilizados. O Topo to Raster, a Krigagem e o IDW demonstram similaridade significativa tanto na variação de área quanto no formato das curvas de volume. Diferentemente, o interpolador TIN se distingue, exibindo curvas, principalmente de volume, que fogem do comportamento encontrado nos outros.

Além da análise gráfica, o presente estudo realizou a análise numérica cota a cota das curvas CAV. No Apêndice A são apresentados os volumes, áreas e cotas para cada um dos interpoladores. É possível notar as variações de volume e área em relação às respectivas cotas, utilizando diferentes interpoladores.

A Tabela 3 destaca as diferenças de volume estimadas entre os anos de 2016 e 2023, levando em consideração dois níveis operacionais do reservatório: mínimo operacional (550 metros) e máximo operacional (555 metros). A variação de volumes entre esses dois períodos nos permite inferir o comportamento do assoreamento conforme modelado por cada interpolador, uma vez que a redução de volume ao longo do tempo está diretamente relacionada ao acúmulo de sedimentos no reservatório.

Tabela 3 – Avaliação de diferença de volume.

		<b>Cota (m)</b>	
		<b>NA Mínimo Operacional</b>	<b>NA Máximo Operacional</b>
		<b>550</b>	<b>555</b>
<b>Topo to Raster</b>	Volume (hm <sup>3</sup> ) (2016)	8,601	16,099
	Volume (hm <sup>3</sup> ) (2023)	8,651	16,286
	<b>Diferença</b>	<b>0,57%</b>	<b>1,14%</b>
<b>Krigagem</b>	Volume (hm <sup>3</sup> ) (2016)	8,468	14,206
	Volume (hm <sup>3</sup> ) (2023)	8,626	14,565
	<b>Diferença</b>	<b>1,85%</b>	<b>2,46%</b>
<b>IDW</b>	Volume (hm <sup>3</sup> ) (2016)	8,474	15,910
	Volume (hm <sup>3</sup> ) (2023)	8,628	16,271
	<b>Diferença</b>	<b>1,78%</b>	<b>2,21%</b>
<b>TIN</b>	Volume (hm <sup>3</sup> ) (2016)	8,055	15,377
	Volume (hm <sup>3</sup> ) (2023)	7,504	14,275
	<b>Diferença</b>	<b>-6,84%</b>	<b>-7,16%</b>

Fonte: Autor (2024).

Ao examinar a Tabela 3 comparativa dos volumes de água no reservatório para os níveis operacionais máximo e mínimo, as diferenças em hectômetros cúbicos (hm<sup>3</sup>) entre os anos de 2016 e 2023 por meio de quatro métodos de interpolação distintos são apresentadas.

Na cota mínima operacional, observamos uma tendência de aumento de volume para a maioria dos interpoladores, o que pode ser uma redistribuição de sedimentos nas áreas mais baixas do reservatório. O Topo to Raster estima um aumento de volume de 0,57% entre 2016 e 2023, indicando um leve acúmulo de sedimentos nas áreas mais baixas do reservatório. Esse leve aumento pode sugerir que, em 2023, mais áreas de volume útil foram detectadas.

A Krigagem e o IDW apresentam aumentos mais expressivos de 1,85% e 1,78%, respectivamente. Esses valores indicam uma maior variação de volume, porém, espera-se que com o passar do tempo, a dinâmica hidrossedimentológica resulte em um acúmulo de sedimento no fundo do reservatório.

Em contrapartida, o interpolador TIN mostra uma redução de volume de -6,84%, o que pode sugerir uma maior deposição de sedimentos no fundo do reservatório. Esse comportamento é mais coerente com a expectativa de assoreamento, onde o volume tende a diminuir com o acúmulo de sedimentos. No entanto, essa queda acentuada também pode estar relacionada à forma como o TIN representa áreas de variação abrupta de profundidade, o que pode influenciar o cálculo do volume.

Para a cota máxima, a tendência de aumento de volume também é observada em três interpoladores. O Topo to Raster mostra um aumento de 1,14% no volume estimado, sugerindo que o volume de água armazenada em 2023 foi ligeiramente superior ao de 2016.

A Krigagem e o IDW exibem variações de 2,28% e 2,21%, respectivamente, indicando aumentos mais significativos no volume estimado. O TIN, mais uma vez, apresenta uma redução de volume, com uma variação de -7,16%, o que sugere que

houve uma redução substancial na capacidade do reservatório nesta cota. Esse comportamento pode estar associado ao acúmulo de sedimentos nas áreas mais rasas, o que é consistente com o efeito do assoreamento. Entretanto, assim como na cota mínima, essa variação também pode ser influenciada pela forma como o TIN modela o relevo submerso.

As variações de volume observadas podem ser influenciadas pelas diferenças nos levantamentos realizados em 2016 e 2023. Fatores como a densidade de pontos de amostragem, a técnica de aquisição de dados e a precisão da navegação podem ter impacto nas estimativas de volume, especialmente em áreas de transição ou de maior complexidade geomorfológica.

Além disso, para uma análise mais completa do assoreamento, seria recomendável realizar estudos geotécnicos que verifiquem a profundidade e a distribuição dos sedimentos no fundo do reservatório. Esses estudos permitiriam uma avaliação mais detalhada das camadas sedimentares e uma melhor compreensão das áreas mais suscetíveis à deposição de material.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados de volume e nos estimadores analisados entre os anos de 2016 e 2023, observa-se que os interpoladores Topo to Raster, Krigagem e IDW estimaram um leve aumento de volume nos dois níveis operacionais do reservatório, enquanto o TIN apresentou uma redução significativa, o que pode indicar uma maior deposição de sedimentos. Essas variações, especialmente as de aumento de volume, não sugerem diretamente o assoreamento, mas podem estar associadas a diferenças nos levantamentos batimétricos e na densidade dos pontos coletados. O TIN, ao apontar uma redução de volume, pode ter captado melhor a deposição sedimentar, o que torna seu resultado mais alinhado com o comportamento esperado do reservatório em termos de assoreamento.

Além dos volumes, a análise dos estimadores de erro, como o RMSE, MAE,  $R^2$  e MAPE, demonstrou que os interpoladores se comportaram de forma consistente, com pequenos erros percentuais e correlação próxima de 1, especialmente no caso do Topo to Raster e do IDW. A Krigagem apresentou maior variabilidade nos seus erros absolutos, embora tenha se mostrado eficaz em algumas regiões do reservatório. Já o TIN, apesar de apresentar a maior variação de volume, também apresentou estimativas de erro dentro dos padrões apresentados nos outros interpoladores.

Esses resultados destacam a importância de compreender o impacto do método de interpolação, bem como a influência de fatores externos como a técnica de levantamento e a densidade de dados. Para uma avaliação mais precisa do assoreamento e das suas implicações para a operação do reservatório, recomenda-se a realização de estudos geotécnicos complementares, que possam fornecer uma visão mais detalhada da distribuição e da profundidade dos sedimentos. Esses estudos, aliados aos levantamentos batimétricos, permitirão uma melhor gestão e planejamento dos recursos hídricos.

Assim, este estudo fortalece a compreensão do monitoramento do assoreamento em reservatórios, de água e geração de energia. A continuidade dessa pesquisa é crucial para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes na prevenção e mitigação dos impactos do assoreamento, garantindo a sustentabilidade e eficácia a longo prazo das infraestruturas hídricas.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019**. Brasília: informe anual, Agência Nacional de Águas, 2019. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br>> Acesso em: 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2017**. Relatório pleno/Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Manual de Estudos de Disponibilidade hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos**. Brasília: 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Orientações para Atualização das Curvas Cota x Área x Volume (Revisão)**. Brasília, 2013, 40 p.

ALVES, F. G.; CAMPOS, R. **Propensão ao assoreamento de reservatórios do semi-árido brasileiro**. X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza, CE, Brasil, v. 1, 2009.

ALVIM, A.M; CHAUDHRY. **Modelo matemático do assoreamento de reservatórios**. In: VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos/ III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos. 236-247p. V3. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133: Execução de Levantamento Topográfico**. Rio de Janeiro – RJ, 2021

BRASIL. **Decreto-lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. Política Nacional de Segurança de Barragens**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 de set. 2010. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/12334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/12334.htm)>

CARMO, E. J. D., RODRIGUES, D. D., & SANTOS, G. R. D. (2015). **Avaliação dos interpoladores krigagem e topo to raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um "as built"**. Boletim de Ciências Geodésicas, 21, 674-690.

CARVALHO, N. D. O., & CATHARINO, M. (1993). **Avaliação do assoreamento de reservatório da UHE Itaipu**. Anais... X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Gramado-RS.

CARVALHO, N. O; FILIZOLA Jr., SANTOS, P. M. C; LIMA, J. E. F. W. - **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios Brasília: ANEEL, 185p. 2000.**

CARVALHO.N. O & CATHARINO.M.G. **Avaliação do assoreamento de reservatório da UHE Itaipu**. In: X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos/ I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. 174-183p. V5. 1993.

CEMIG. **Usina Hidrelétrica de Rosal**. 2023. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/usina/uhe-rosal/>> Acesso em: 2023.

CHAI, T., & DRAXLER, R. R. (2014). **Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)**. *Geoscientific model development discussions*, 7(1), 1525-1534.

CURTARELLI, M., LEÃO, J., OGASHAWARA, I., LORENZZETTI, J., & STECH, J. (2015). **Assessment of spatial interpolation methods to map the bathymetry of an Amazonian hydroelectric reservoir to aid in decision making for water management**. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 220-235.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO - DHN. **NORMAM 25: Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos**. Marinha do Brasil. Brasil, 52p., 2017.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO - DSG. **Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)**. Brasil, 2016. Disponível em: <[http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET\\_CQDG\\_1a\\_edicao\\_2016.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf)>.

Esri. (n.d.). **How Topo to Raster works**. ArcGIS Pro Documentation. Retrieved from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/an-overview-of-the-raster-interpolation-toolset.htm>. Acesso: 02/09/2024.

FERREIRA, I. O. 2018. **Controle de qualidade em levantamentos hidrográficos**.

FERREIRA, I. O., ANDRADE, L. C. D., TEIXEIRA, V. G. ; SANTOS, F. C. M. (2022). **State of art of bathymetric surveys**. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 28.

FERREIRA, Í. O., NETO, A. A.; MONTEIRO, C. S. 2017. **O uso de embarcações não tripuladas em levantamentos batimétricos**. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(10), 1885-1903.

FERREIRA, Í. O., RODRIGUES, D. D., NETO, A. A.; MONTEIRO, C. S. 2016. **Modelo de incerteza para sondadores de feixe simples**. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(5), 863-881.

FLORIANI, B. L. **Proposta de uma solução conceitual de um sistema de investigação subaquático para águas rasas**. 2013. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2013.

GOODCHILD, M. F., D. M. MARK. 1987. **The fractal nature of geographic phenomena**. *Annals of Association of American Geographers*. 77 (2): 265–278.

HENGL, T.; NUSSBAUM, M.; WRIGHT, M. N.; HEUVELINK, G. B. M.; GRÄLER, B. **Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial**

**and spatio-temporal variables.** PeerJ, v. 6, e5518, 2018.  
<https://doi.org/10.7717/peerj.5518>

HUPP, C. R., NOE, G. B., SCHENK, E. R., & BENTHEM, A. J. (2013). **Recent and historic sediment dynamics along Difficult Run, a suburban Virginia Piedmont stream.** *Geomorphology*, 180, 156-169. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.09.016

HUTCHINSON, M.F.; GALLANT, J.C. 2000. **Digital elevation models and representation of terrain shape.** In: J.P. Wilson and J.C. Gallant (eds) *Terrain Analysis*. Wiley, New York, pp. 29–50.

Hutchinson, M.F., Xu, T. and Stein, J.A. 2011. **Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure.** In: *Geomorphometry 2011*, edited by T. Hengel, I.S. Evans, J.P. Wilson and M. Gould, pp. 19–22. Redlands, California, USA. See: <http://geomorphometry.org/HutchinsonXu2011>.

HYPACK, INC. **HYPACK – Hydrographic Survey Software User Manual.** Middletown, USA, 1784p., 2021.

IBRAHIM, P. O., ET AL. (2023). **Modelling topo-bathymetric surface using a triangulation irregular network (TIN) of Tunga Dam in Nigeria.** *Applied Geomatics*, 15(1), 281-293.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro.** Rio de Janeiro: Geociências, 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentosreferencia/normas/16463-especificacao-e-normas-gerais-para-levantamentos-geodesicos-emterritorio-brasileiro>> Acesso em: jun 2023.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION - IHO. **Manual on Hydrography.** Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2005.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION - IHO. **Standards for Hydrographic Surveys S-44.** 6th ed. Monaco, International Hydrographic Organization, 2020.

JAMES, G., WITTEN, D., HASTIE, T., & TIBSHIRANI, R. (2013). **An Introduction To Statistical Learning (Vol. 112, P. 18).** NEW YORK: SPRINGER.

KUHNEN, B. D. S. 2020. **Método e técnica para obtenção da curva cota x área x volume (CAV).** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2020.

LI, J., & HEAP, A. D. (2014). **A Review Of Spatial Interpolation Methods For Environmental Scientists.** *Geoscience Australia, Record 2014/23.* Canberra: Geoscience Australia.

LU, G. N.; WONG, D. W. **An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique**. *Computers & Geosciences*, v. 34, n. 9, p. 1044-1055, 2008.

MATOS, A. J. S. **Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional “CAV-NH”**. 137 p. Tese Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental –Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MATHERON, G. **Principles of geostatistics**. *Economic Geology*, Lancaster, 58: 1246-1266, 1963.

MOURA-BUENO, J. M., ET AL. (2016). **Assessment Of Digital Elevation Model For Digital Soil Mapping In A Watershed With Gently Undulating Topography**. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 40, E0150022. Doi: 10.1590/18069657rbcs20150022

PHILIP, G. M., & WATSON, D. F. (1982). **"A Precise Method for Determining Contoured Surfaces."** *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 22: 205–212.

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

SANTOS, A. C.; REIS, A.; MENDIONDO, E. M. **Segurança hídrica no Brasil: situação atual, principais desafios e perspectivas futuras**. São Paulo: *Revista DAE*, v. 68, n 225, 2020. Disponível em: <[http://revistadae.com.br/artigos/artigo\\_edicao\\_225\\_n\\_1882.pdf](http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_225_n_1882.pdf)> Acesso em: jun 2023.

SANTOS, D. DA S., & SILVA, R. M. DA. (2020). **Aplicação de redes neurais mlp na predição da evapotranspiração de referência / Application of mlp neural networks in the prediction of reference evapotranspiration**. *Brazilian Journal of Development*, 6(5), 25293–25305. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-110>

SANTOS, F. C. M., FERREIRA, I. O., DE ANDRADE, L. C., TEIXEIRA, V. G. 2019. **Avaliação Qualitativa e Quantitativa da Ferramenta de Pré-seleção Sort para Dados Monofeixe e Multifeixe**. *Rev. Bras. Cartogr*, 71(4), 10 64-1088.

SOUZA, L A P. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

VIEIRA, S. R.. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 1-53, 2000.

WAHBA, G. 1990. **Spline models for Observational data**. Paper presented at CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics. Philadelphia: Soc. Ind. Appl. Maths.

WATSON, D. F., & PHILIP, G. M. (1985). **"A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation."** Geoprocessing, 2: 315–327.

YANG, M., MOUAZEN, A., ZHAO, X., & GUO, X. (2020). **Assessment of a soil fertility index using visible and near-infrared spectroscopy in the rice paddy region of southern China**. European Journal of Soil Science, 71(4), 615-626.

ZHANG, J., HARFF, J., SCHNEIDER, R., & WU, C. (2014). **Development of a modelling methodology for simulation of long-term morphological evolution of the southern Baltic coast**. Geomorphology, 204, 425-443. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.08.018

## APÊNDICE A

Tabela A.1 – Curva CAV gerado por Topo to Raster.

	<b>Topo to Raster</b>			
<b>COTA</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>) - 2016</b>	<b>Volume (hm<sup>3</sup>) - 2016</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>) - 2023</b>	<b>Volume (hm<sup>3</sup>) - 2023</b>
<b>555</b>	1,721	17,810	1,670	17,740
<b>554</b>	1,720	16,090	1,634	16,087
<b>553</b>	1,699	14,376	1,614	14,463
<b>552</b>	1,581	12,731	1,557	12,872
<b>551</b>	1,437	11,223	1,472	11,357
<b>550</b>	1,313	9,851	1,384	9,928
<b>549</b>	1,198	8,594	1,279	8,594
<b>548</b>	1,088	7,451	1,166	7,373
<b>547</b>	0,985	6,417	1,063	6,259
<b>546</b>	0,897	5,476	0,966	5,245
<b>545</b>	0,814	4,621	0,849	4,335
<b>544</b>	0,731	3,848	0,737	3,544
<b>543</b>	0,647	3,158	0,621	2,864
<b>542</b>	0,552	2,559	0,515	2,296
<b>541</b>	0,456	2,054	0,425	1,830
<b>540</b>	0,378	1,639	0,348	1,443
<b>539</b>	0,312	1,295	0,289	1,125
<b>538</b>	0,262	1,009	0,238	0,862
<b>537</b>	0,215	0,770	0,190	0,648
<b>536</b>	0,166	0,580	0,147	0,481
<b>535</b>	0,131	0,433	0,116	0,351
<b>534</b>	0,107	0,314	0,095	0,246
<b>533</b>	0,088	0,217	0,076	0,161
<b>532</b>	0,069	0,139	0,058	0,094
<b>531</b>	0,052	0,078	0,039	0,046
<b>530</b>	0,033	0,035	0,021	0,016
<b>529</b>	0,015	0,012	0,006	0,004

Tabela A.2 – Curva CAV gerado por IDW.

COTA	IDW			
	Área (km <sup>2</sup> ) - 2016	Volume (hm <sup>3</sup> ) - 2016	Área (km <sup>2</sup> ) - 2023	Volume (hm <sup>3</sup> ) - 2023
555	1.722	15.908	1.717	16.270
554	1.720	14.186	1.691	14.570
553	1.606	12.509	1.580	12.942
552	1.412	11.003	1.490	11.403
551	1.255	9.671	1.391	9.963
550	1.136	8.633	1.281	8.628
549	1.033	7.394	1.181	7.403
548	0.939	6.410	1.073	6.279
547	0.870	5.507	0.972	5.259
546	0.800	4.670	0.865	4.338
545	0.718	3.909	0.707	3.559
544	0.642	3.227	0.602	2.908
543	0.558	2.627	0.512	2.348
542	0.459	2.118	0.413	1.891
541	0.388	1.696	0.341	1.513
540	0.323	1.344	0.291	1.197
539	0.275	1.045	0.235	0.936
538	0.223	0.795	0.188	0.724
537	0.172	0.598	0.145	0.559
536	0.135	0.446	0.114	0.430
535	0.108	0.325	0.096	0.326
534	0.087	0.227	0.084	0.236
533	0.071	0.148	0.074	0.157
532	0.056	0.084	0.063	0.089
531	0.037	0.037	0.039	0.037
530	0.016	0.012	0.014	0.010
529	0.004	0.003	0.004	0.002

Tabela A.3 – Curva CAV gerado por Krigagem.

	<b>Krigagem</b>			
<b>COTA</b>	<b>Área (km²) - 2016</b>	<b>Volume (hm³) - 2016</b>	<b>Área (km²) - 2023</b>	<b>Volume (hm³) - 2023</b>
<b>555</b>	1.718	15.823	1.721	16.314
<b>554</b>	1.717	14.105	1.703	14.603
<b>553</b>	1.621	12.42	1.615	12.947
<b>552</b>	1.466	10.876	1.516	11.379
<b>551</b>	1.319	9.485	1.42	9.911
<b>550</b>	1.192	8.233	1.305	8.546
<b>549</b>	1.065	7.104	1.203	7.297
<b>548</b>	0.966	6.089	1.091	6.151
<b>547</b>	0.878	5.167	0.999	5.107
<b>546</b>	0.791	4.332	0.883	4.165
<b>545</b>	0.698	3.586	0.729	3.363
<b>544</b>	0.615	2.93	0.609	2.695
<b>543</b>	0.521	2.362	0.505	2.137
<b>542</b>	0.431	1.885	0.408	1.685
<b>541</b>	0.355	1.494	0.331	1.314
<b>540</b>	0.289	1.174	0.274	1.012
<b>539</b>	0.243	0.909	0.215	0.769
<b>538</b>	0.196	0.689	0.167	0.578
<b>537</b>	0.154	0.516	0.133	0.429
<b>536</b>	0.123	0.378	0.105	0.311
<b>535</b>	0.1	0.267	0.085	0.217
<b>534</b>	0.08	0.177	0.067	0.141
<b>533</b>	0.061	0.107	0.051	0.081
<b>532</b>	0.043	0.054	0.034	0.039
<b>531</b>	0.023	0.022	0.017	0.013
<b>530</b>	0.009	0.006	0.005	0.003
<b>529</b>	0.002	0.001	0.001	0

Tabela A.4 – Curva CAV gerado por TIN.

COTA	TIN			
	Área (km <sup>2</sup> ) - 2016	Volume (hm <sup>3</sup> ) - 2016	Área (km <sup>2</sup> ) - 2023	Volume (hm <sup>3</sup> ) - 2023
555	1.651	14.684	1.447	13.148
554	1.650	13.728	1.433	12.837
553	1.571	12.107	1.393	11.418
552	1.416	10.616	1.339	10.052
551	1.280	9.270	1.275	8.744
550	1.151	7.915	1.196	7.137
549	1.031	6.967	1.087	6.365
548	0.936	5.984	0.972	5.335
547	0.851	5.092	0.857	4.423
546	0.767	4.283	0.747	3.622
545	0.684	3.558	0.641	2.927
544	0.608	2.911	0.531	2.342
543	0.518	2.348	0.438	1.857
542	0.431	1.873	0.360	1.460
541	0.356	1.482	0.297	1.131
540	0.288	1.163	0.246	0.861
539	0.240	0.899	0.195	0.640
538	0.194	0.682	0.150	0.468
537	0.152	0.510	0.117	0.335
536	0.122	0.374	0.087	0.234
535	0.100	0.263	0.067	0.158
534	0.080	0.173	0.051	0.099
533	0.061	0.103	0.037	0.055
532	0.041	0.052	0.024	0.025
531	0.022	0.021	0.012	0.007
530	0.009	0.006	0.002	0.001
529	0.002	0.001	0.000	0.000