



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia - FAENG



ÉRIC VIEIRA CANO

**MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DA BATIMETRIA
ADQUIRIDA POR VEÍCULO DE SUPERFÍCIE NÃO
TRIPULADO**

P G R N

Campo Grande, MS.

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS E ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS

ÉRIC VIEIRA CANO

**MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DA BATIMETRIA
ADQUIRIDA POR VEÍCULO DE SUPERFÍCIE NÃO
TRIPULADO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Naturais. Geoprocessamento Aplicado.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Conceição Paranhos Filho
Coorientador: Prof. Dr. Alisson André Ribeiro

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Conceição Paranhos Filho
Orientador PGRN- UFMS

Prof. Dr. Alisson André Ribeiro
Coorientador PGRN- UFMS

Prof^ª. Dr^ª. Camila Leonardo Miotto
Instituição: UFR

Dr. César Claudio Cáceres Encina
Instituição: UFMS

Campo Grande, MS.
2022

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por ter colocado no meu caminho todos que de alguma forma contribuíram para que eu pudesse buscar essa grande conquista.

Agradeço especialmente à minha esposa Priscila Lopo Guimarães Cano por estar ao meu lado em todos os momentos, incentivando e auxiliando de todas as formas para que eu pudesse concluir este trabalho, trazendo carinho, paciência, dedicação e amor.

Aos membros da banca pelas valiosas contribuições, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Antônio Conceição Paranhos Filho a quem sou extremamente grato pela orientação, dedicação de tempo para sanar as minhas dúvidas e me colocar na direção correta, transmitindo conhecimento e apoio para realização deste trabalho, trazendo calma, café e amizade nos momentos de necessidade.

Gratidão pela participação do professor coorientador Dr. Alisson André Ribeiro cuja dedicação e atenção foram essenciais para que este trabalho fosse concluído satisfatoriamente.

Agradeço ao CNPQ pela bolsa de mestrado concedida vinculada ao projeto de pesquisa de inovação.

Grato a todos os integrantes do projeto de pesquisa, da parceria entre a UFMS e a empresa Arater Consultoria Ambiental, que foram imprescindíveis para que esse trabalho pudesse acontecer.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) pelo acesso ao Portal de Periódicos.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais (PPGRN), da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo (FAENG) da Fundação

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), pela atenção, empenho e dedicação demonstrada no decorrer do curso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS/MEC - Brasil.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABELAS	5
RESUMO GERAL	6
GENERAL ABSTRACT.....	6
INTRODUÇÃO GERAL	7
PRIMEIRO CAPÍTULO: MAPEAMENTO DE PESQUISAS RELACIONADAS AOS VEÍCULOS DE SUPERFÍCIE NÃO-TRIPULADO (USV)	11
1.1. Introdução.....	12
1.2. Material e Métodos.....	13
1.3. Resultados e Discussão.....	16
1.4. Conclusão	22
1.5. Referências Bibliográficas.....	23
SEGUNDO CAPÍTULO: AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO PARA GERAÇÃO DE MODELOS BATIMÉTRICOS NUMÉRICOS EM RESERVATÓRIO ARTIFICIAL	26
2.1. Introdução.....	27
2.2. Material e Métodos.....	29
2.2.1. Área de Estudo	29
2.2.2. Aquisição de Dados por Veículo de Superfície Não Tripulado	30
2.2.3. Procedimento Metodológico	31
2.3. Resultados e Discussão.....	35
2.4. Conclusão	46
2.5. Referências Bibliográficas.....	47
CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Cadeia de caracteres utilizada neste estudo	14
Figura 1.2. Fluxograma para criação do portfólio de estudo.....	15
Figura 1.3. Evolução temporal das publicações dentro da temática relacionada ao USV	16
Figura 1.4. Número de publicações por autoria dentro da temática relacionada ao USV	18
Figura 1.5. Mapa de rede co-autoria.....	19
Figura 1.6. Mapa de rede co-ocorrência de palavras-chave	20
Figura 1.7. Mapa de rede de palavras-chave por ano	21
Figura 2.1. Localização reservatório na APA do Córrego Ceroula.....	29
Figura 2.2. (a) Protótipo de um USV (b) Aquisição dos dados no dia da coleta.....	31
Figura 2.3. Fluxograma de trabalho.....	32
Figura 2.4. Pontos de amostragem da rota batimétrica.....	35
Figura 2.5. Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método IDW	37
Figura 2.6. Vista Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método TIN.	37
Figura 2.7. Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método MBS.....	38
Figura 2.8. Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método TPS	38
Figura 2.9. Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método OK	39
Figura 2.10. Variações entre as profundidades interpoladas (métodos determinísticos).	41
Figura 2.11. Variações entre as profundidades interpoladas (métodos determinísticos e geoestatístico).	42
Figura 2.12. Modelo de variograma ajustado e Validação Cruzada da Krigagem (OK).44	
Figura 2.13. Iterações da modelagem pela Krigagem Ordinária.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Quantitativo de publicações dentro da temática relacionada ao USV	18
Tabela 2.1. Parametrização Interpolação métodos determinísticos.....	34
Tabela 2.2. Parametrização Interpolação Krigagem Ordinária	34
Tabela 2.3. Estatísticas dos dados dos pontos batimétricos coletados.	36
Tabela 2.4. Volumes estimados para cada interpolação.	39
Tabela 2.5. Valores mínimos, máximos e médios, desvio padrão e variância para os dados estimados.....	43
Tabela 2.6. Erros das Interpolações com métodos determinísticos.....	43

RESUMO GERAL

Este estudo propõe métodos de interpolação para dados batimétricos obtidos por Veículo de Superfície Não Tripulado (USV). O estudo está organizado em dois capítulos: o primeiro capítulo apresenta o mapeamento das produções científicas relacionadas aos veículos de superfície não tripulados (USV), através de análise cientométrica, destacando artigos e artigos de revisão desta área de conhecimento e demonstrando a quantidade de publicações até o ano de 2021. O segundo capítulo apresenta a comparação da eficiência dos métodos de interpolação Rede Triangular Irregular (TIN), o Inverso da Distância Ponderada (IDW), Multinível B-Spline (MBS), Spline de Placa Fina (TPS) e Krigagem Ordinária (OK), e a análise de qual método representa melhor a superfície batimétrica de um reservatório artificial localizado em Campo Grande/MS. Através do estudo foi possível confirmar que as pesquisas focadas no aperfeiçoamento de veículos de superfície não tripulados (USV), como também a aplicação desse equipamento para estudos ambientais continuará crescendo, visto que os resultados sempre podem ser aprimorados, assim como a metodologia pode ser aplicada em outros ambientes aquáticos.

Palavras-chave: batimetria, interpoladores, cientometria, *USV*, barragem

GENERAL ABSTRACT

This study proposes interpolation methods for bathymetric data obtained by Unmanned Surface Vehicle (USV). The study is organized into two chapters: the first chapter presents the mapping of scientific production related to unmanned surface vehicles (USV), through scientometric analysis, highlighting articles and review articles in this area of knowledge and demonstrating the number of publications to the date of year 2021. The second chapter presents the comparison of the efficiency of the interpolation methods Triangulated Irregular Network (TIN), Inverse Weighted Distance (IDW), Multilevel B-Spline (MBS), Thin Plate Spline (TPS) and Ordinary Kriging (OK), and the analysis of which method best represents the bathymetric surface of an artificial reservoir located in Campo Grande/MS. Through the study, it was possible to confirm that the research focused on the improvement of unmanned surface vehicles (USV), as well as the application of this equipment for environmental studies will continue to grow, since the results can always be improved, as well as the methodology can be applied in other aquatic environments.

Keywords: bathymetry, interpolators, scientometrics, *USV*, dam

INTRODUÇÃO GERAL

A dinâmica acelerada do uso de recursos, como o solo e água, em conjunto com as mudanças climáticas, tem impacto direto na segurança hídrica, acarretando constante declínio na diversidade ecológica e aumento da vulnerabilidade hídrica (PAHL-WOSTL et al., 2012).

Nos últimos anos, essa problemática vem sendo cada vez mais discutida e estudada (COOK; BAKKER, 2012, HOEKSTRA et al., 2018, YOUNG et al., 2021), sendo um assunto muito relevante no mundo todo e também acertado na Agenda 2030 (NAÇÕES UNIDAS, 2015) da ONU, a qual apresenta entre alguns dos objetivos para o desenvolvimento sustentável a necessidade de assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos. Nesse contexto, o conhecimento sobre a dinâmica dos sistemas hídricos que afetam a disponibilidade se torna cada vez mais importantes, principalmente dos ambientes de água doce, como rios, lagos e reservatórios, os quais são intensamente demandados pela sociedade (ALSDORF et al., 2007).

As represas e reservatórios são fundamentais para a sustentabilidade dos recursos hídricos, sendo comumente utilizadas para regularizar a disponibilidade hídrica em localidades áridas e semiáridas, como também recomendadas para áreas rurais garantindo que as atividades de produção não sejam afetadas em momentos de estiagem (ALAHIANE et al., 2014).

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010), referente à Política Nacional de Segurança de Barragens, em seu Art. 2º estabelece a seguinte definição:

I - barragem: qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas;

Uma das formas de se obter informações sobre corpos d'águas é através de levantamentos hidrográficos. A batimetria acústica é um método indireto de detecção que caracteriza a superfície subaquática através do levantamento de profundidades servindo para várias aplicações, sobretudo em barragens, definindo suas dimensões e relação cota-área-volume, além de auxiliar no monitoramento de assoreamentos. Os dados batimétricos são essenciais para o monitoramento da topografia de fundo, transporte de sedimentos e cartas de navegação (LI et al., 2020, JAWAK et al., 2015), sendo cada vez mais importantes para hidrologia e geomorfologia, sobretudo na modelagem hidrodinâmica possibilitando conhecer mudanças em terreno submerso, o nível de água e no armazenamento do reservatório, porém estes são muitas vezes escassos ou indisponíveis (ALVAREZ et al., 2018).

A realização de medições batimétricas por métodos tradicionais (utilizando embarcações tripuladas) em águas ultra rasas, ou seja, cursos d'água com profundidade inferior a 1 m, muitas vezes são difíceis ou, em muitos casos, impossíveis devido a problemas relacionados à manobra segura da embarcação. Devido a isso, são consideradas diferentes possibilidades, de maneiras mais práticas de levantamento, como é o caso dos levantamentos automatizados que servem para subsidiar informações aos órgãos competentes, para tomadas de decisões no gerenciamento e utilização dos recursos hídricos. Por esta razão, o uso de Veículos de Superfície Não Tripulados (USV) hidrográficos fornece um método alternativo promissor para realizar tais medições batimétricas (SPECHT et al., 2019, ÁLVARES et al., 2000).

Kim e Seio (2012) afirmam que com os recentes avanços tecnológicos, muitos tipos de veículos terrestres, aéreos ou de superfície não tripulados foram desenvolvidos e começaram a ser implantados em ambientes complexos. Para Liu et al (2016), as mudanças climáticas, anormalidades ambientais, requisitos de pessoal e questões de

segurança nacional levaram a uma forte demanda das comunidades comerciais, científicas e militares pelo desenvolvimento de veículos de superfície não tripulados (USV) inovadores, também conhecidos como veículos de superfície autônomos (ASV) ou embarcações autônomas de superfície (ASC).

Os USV são veículos de superfície não tripulados com comando humano realizado a distância. Veículos de superfície não tripulados preenchem um espaço cada vez mais importante no desenvolvimento dos veículos robóticos, equipados com sensores apropriados podem coletar informações sobre o ambiente e transmitir os dados coletados a uma alta taxa de transmissão. Como parte de uma rede de veículos autônomos, um USV pode fornecer uma interface móvel entre terra, ar e espaço, agindo sozinho ou em equipe, pode caracterizar um ambiente e fornecer mapas batimétricos para um supervisor humano (MORGADO, 2016).

Os veículos de superfície não tripulados provam que podem tirar o homem de situações de perigo e minimizar os esforços de mão de obra, aumentando a capacidade de segurança (ROWLEY, 2018).

Portanto, o objetivo geral deste estudo é avaliar métodos de interpolação para dados batimétricos obtidos através de veículo de superfície não tripulado (USV). No primeiro capítulo é apresentado o mapeamento das produções científicas relacionadas aos veículos de superfície não tripulados (USV), através de análise cienciométrica, destacando artigos e artigos de revisão desta área de conhecimento e demonstrando a quantidade de publicações até o ano de 2021, enquanto no capítulo 2 é comparada a eficiência dos métodos de interpolação Rede Triangular Irregular (TIN), o Inverso da Distância Ponderada (IDW), Multinível *B-Spline* (MBS), *Spline* de Placa Fina (TPS) e Krigagem Ordinária (OK), com a análise de qual método representa melhor a superfície batimétrica de um reservatório artificial localizado em Campo Grande/MS.

Este estudo pretende contribuir na determinação do melhor método de interpolação para mapeamentos batimétricos em barragens, especialmente feito com dados obtidos por veículo de superfície aquática não tripulado, pois apesar de haver estudos que comparem métodos de interpolação para mapeamento batimétrico, não há

um consenso sobre qual método é o melhor para estudos em barragens, além de serem poucos os estudos que se utilizam das ferramentas do *software* livre QGIS (QGIS DEVELOPMENT, 2022).

PRIMEIRO CAPÍTULO: MAPEAMENTO DE PESQUISAS RELACIONADAS AOS VEÍCULOS DE SUPERFÍCIE AQUÁTICA NÃO-TRIPULADO (USV)

Resumo: Os veículos autônomos são utilizados há mais de 60 anos, com o avanço da tecnologia e novos enfoques desenvolveram-se os veículos de superfície aquática não tripulados conhecidos como USV (*Unmanned Surface Vehicle*). Este estudo objetivou mapear quantitativamente as produções científicas relacionadas aos veículos de superfície não tripulados (USV), através de análise cienciométrica, destacando artigos e artigos de revisão desta área de conhecimento e demonstrando a quantidade de publicações até o ano de 2021. A partir de coletas de dados nas bases *Scopus* e *Web of Science*, foram realizadas exclusão de documentos duplicados e análises prévias dos títulos e resumos, gerando um portfólio geral de estudo com 1.190 publicações. O resultado deste mapeamento demonstrou que as pesquisas são focadas em tecnologias para a criação de veículos de superfície não tripulados (USV) com recursos avançados de controle e automação, e que continuam sendo desenvolvidas para o aperfeiçoamento do equipamento, pode-se perceber também que a produção sobre o tema seguirá em crescimento por ser um assunto relativamente novo e com grandes perspectivas para o desenvolvimento de novas pesquisas, métodos e aplicações. Por fim, espera-se que este estudo auxilie no mapeamento de pesquisas, principalmente sobre temas ainda pouco difundidos na ciência, para aumentar a visibilidade e compreensão sobre as inovações em pesquisas.

Palavras-chave: Cienciométrica, Veículos autônomos, Inteligência artificial, VOSviewer

Abstract: Autonomous vehicles have been used for over 60 years, with the advancement of technology and new approaches, unmanned surface vehicles known as USV (*Unmanned Surface Vehicle*) were developed. This study aimed to quantitatively map the scientific productions related to unmanned surface vehicles (USV), through scientometric analysis, highlighting articles and review articles in this area of knowledge and demonstrating the number of publications until the year 2021. From collections of data in the Scopus and Web of Science databases, exclusion of duplicate documents and previous analyzes of titles and abstracts were carried out, generating a general study portfolio with 1,190 publications. The result of this mapping showed that the research is focused on technologies for the creation of unmanned surface vehicles (USV) with advanced control and automation resources, and that continue to be developed for the improvement of the equipment, it can also be seen that the production on the subject will continue to grow as it is a relatively new subject with great prospects for the development of new research, methods and applications. Finally, it is expected that this study will help in the mapping of research, especially on topics that are not yet widespread in science, to increase visibility and understanding of research innovations.

Keywords: Scientometrics, Autonomous vehicles, Artificial intelligence, VOSviewer.

1.1. INTRODUÇÃO

Os veículos autônomos são utilizados há mais de 60 anos para apoiar operações militares (BOARD; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2005). Com o avanço da tecnologia, foram dados novos enfoques as pesquisas científicas relacionadas aos Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV), também conhecidos como Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS) ou drones, com destaque as áreas de sensoriamento remoto, engenharias, ciências terrestres e ciências ambientais (VÉLEZ-NICOLÁS et al., 2021). Tratando-se de questões relacionadas a recursos hídricos, houve a necessidade de desenvolver veículos autônomos que pudessem navegar superfícies aquáticas ou subaquáticas para tornar possível um maior conhecimento destes ambientes, com isso surgiram os *Unmanned Underwater Vehicles* (UUV), *Unmanned Surface Vehicles* (USV) e *Remotely Operated Vehicles* (ROV) (PEARSON et al., 2014).

As utilizações possíveis dessa ferramenta incluem mapeamento batimétrico, busca e salvamento, inspeção estrutural de pontes, segurança nacional, monitoramento ambiental, pesquisas gerais em robótica e oceanografia, entre outras (FERREIRA et al., 2017, MANLEY, 2008, PARAVISI et al., 2019, SILVA et al., 2018).

Por se tratar de um equipamento em constante desenvolvimento, os estudos atuais são focados, em sua grande maioria, no aprimoramento da movimentação e rastreamento dos veículos (WANG et al., 2019, ZHUANG et al., 2020, ZHAO et al., 2020, LIU et al., 2021), a mesma situação é encontrada nos artigos de revisão envolvendo os veículos autônomos de superfícies (FAYAZ et al., 2022, BALESTRIERI et al., 2021). O artigo de revisão feito por Liu et al (2022) fornece um suporte técnico e teórico de “aerobarcos” não tripulados destinados a aplicações no meio ambiente e agricultura. Portanto, faltam estudos que quantifiquem estas pesquisas de forma a demonstrar o seu estado atual e facilitar a compreensão sobre a temática.

A cienciometria usa técnicas matemáticas de análise estatística para investigar as características da pesquisa científica e se encarrega de avaliar a produção científica podendo ser considerada como um instrumento da sociologia da ciência (SPINAK, 1998, RAZERA, 2016). De acordo com Spinak (1998), os assuntos de interesse da cienciometria incluem o crescimento quantitativo da ciência, o desenvolvimento de disciplinas e subdisciplinas, a relação entre ciência e tecnologia, a obsolescência de paradigmas científicos, a estrutura de comunicação entre cientistas, a produtividade e criatividade de pesquisadores, as relações entre desenvolvimento científico e crescimento econômico e etc.

Diante disso, este estudo se justifica ao trazer um mapeamento das pesquisas relacionadas aos veículos de superfície aquática não tripulados, quantificando as publicações feitas num mesmo período nas plataformas *Scopus* e *Web of Science*, de forma a auxiliar pesquisadores, e identificar as lacunas e tendências sobre esta temática. Neste estudo pretendeu-se mapear as produções científicas relacionadas aos veículos de superfície aquática não tripulados até o ano de 2021.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir o objetivo de mapear os dados de produções científicas relacionadas aos veículos autônomos de superfície aquática (USV), considerou-se todo o histórico, a partir da primeira publicação registrada sobre o tema até o ano de 2021. Posteriormente, para extração de dados, foram escolhidas plataformas de base de dados científicos globais, *Scopus* e *Web of Science*, as quais concentram a maior abrangência de periódicos com alto fator de impacto, o que torna possível conhecer o tema em escala global, além disto, os acervos têm qualidade reconhecida sendo comumente utilizados em estudos de bibliometria e cienciometria.

Para a realização da busca, as palavras-chave foram definidas em inglês, pois é o idioma padrão para publicações internacionais, compreendendo as denominações possíveis da ferramenta veículo autônomos de superfície aquática (USV) formando assim uma cadeia de caracteres (*string*) que funciona como um filtro de busca. A cadeia de caracteres foi definida utilizando o operador booleano OR e símbolos como aspas e asterisco (Figura 1.1).

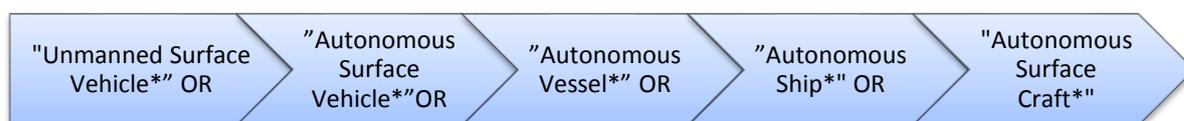


Figura 1.1 – Cadeia de caracteres utilizada neste estudo

Segundo Pizzani et al (2012) para obtenção de documentos em bases de dados são utilizados os operadores booleanos AND, OR e NOT, e truncagem de palavras para facilitar o processo de busca e seleção de informação. O operador OR é utilizado para ampliar a pesquisa quando um termo/nome possui sinônimos, variantes ou grafias diferentes. Em relação a truncagem de palavras, temos o sinal asterisco (*) que é utilizado quando o termo/nome possui formas derivadas ou plurais, enquanto as aspas (“”) são utilizadas quando o termo/nome é composto por mais de uma palavra.

Com essas definições prévias, foram refinadas as pesquisas utilizando filtros adicionais disponíveis dentro das duas plataformas, sendo considerados apenas documentos dos tipos artigo e artigo de revisão até o ano de 2021, obtendo-se o total de publicações em cada base, além das informações de autores, data de publicação, publicação por periódico, publicação por país e palavras-chave.

Após essa etapa, os dados coletados, em ambas as bases, foram exportados para o *software* Endnote (BRAMER et al., 2016) possibilitando a unificação dos documentos e exclusão de duplicados. A partir disso foi feita uma análise através da leitura dos títulos e resumos de cada documento, essa filtragem foi fundamental para

selecionar apenas os artigos dentro da temática: veículo autônomo de superfície aquática (USV), assim gerando um portfólio geral de estudo (Figura 1.2). Cabe salientar que a filtragem realizada excluiu qualquer termo ou ferramenta que não caracterizava um USV.



Figura 1.2 – Fluxograma para criação do portfólio de estudo

A criação de um portfólio possibilitou que as análises das informações adquiridas fossem feitas de uma maneira geral, considerando as duas bases de dados, avaliando as tendências do número de publicações por ano; os periódicos e autores com as maiores publicações sobre o assunto, palavras-chaves mais utilizadas, bem como as obras de maior impacto. Os resultados foram representados em gráficos e tabelas, como também foi possível criar mapas de rede de palavras-chave e autores. Para criação dos mapas de redes utilizou-se as ferramentas do *software* VOSViewer (VAN ECK; WALTMAN, 2013) através da importação do portfólio em formato de extensão RIS. No mapa da rede de palavras-chave, foi utilizado o tipo de análise “co-ocorrência” e o método de contagem foi “contagem total” com filtragem de “número mínimo de ocorrências de palavra-chave” definido em 10. Para o mapa da rede de autores foi utilizado o tipo de análise “co-autoria” e o método de contagem foi “contagem total” com filtragem de “número máximo de autores por documento” definido em 10, e “número mínimo de documentos por autor” definido em 15.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na coleta de dados, utilizando da cadeia de caracteres e restringindo para apenas artigos e artigos de revisão, foram obtidos 1.635 documentos da base *Scopus* e 1.208 da base *Web of Science*, totalizando 2.843 documentos. Após exclusão de duplicados e análise de títulos e resumos obteve-se como portfólio final 1.190 documentos. A partir do portfólio foi possível verificar a relação entre o número de documentos publicados ao longo dos anos (Figura 1.3).

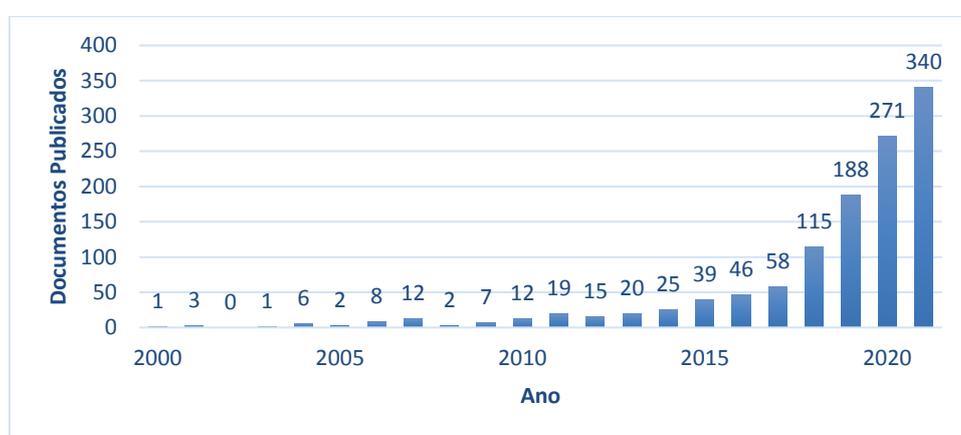


Figura 1.3 – Evolução temporal das publicações dentro da temática relacionada ao USV.

O gráfico acima demonstrou um crescimento constante a partir do ano de 2012, apresentando um pico na quantidade de publicações no último ano pesquisado (2021) com 340 publicações. Este crescimento demonstra uma tendência de aumento na produção científica relativa aos veículos de superfície aquática não tripulados.

O primeiro estudo envolvendo a temática foi publicado no ano 2000 denominado “*Robotic ocean vehicles for marine science applications: The european ASIMOV Project*”. Este estudo teve como objetivo o desenvolvimento e integração de sistemas tecnológicos avançados para operação de dois tipos de veículos autônomos, *Autonomous Surface Craft* (ASC) e um *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV), ambos utilizados para estudar a extensão de fontes hidrotermais em águas pouco profundas (PASCOAL et al., 2000).

Os estudos publicados entre os anos de 2001 e 2012, início do crescimento constante, são em sua maioria relacionados ao desenvolvimento de veículos de superfície aquática não tripulados, de interesse militar, para aplicação em ambientes oceânicos e costeiros, como também criação de sistemas de sensores, algoritmos e componentes de controle (JESUS et al., 2001, LEE; KIM, 2004, CACCIA et al., 2007, FRANÇOLIN et al., 2012). Destaca-se o estudo realizado por Díaz-Gutiérrez et al (2011), que desenvolveu um veículo autônomo de superfície destinado a medição de vazão em rios, sendo uma alternativa inovadora para época. No estudo de Kitts et al (2012) também é desenvolvido um veículo autônomo de superfície inovador, utilizado para realizar mapeamentos batimétricos de águas costeiras, estuarinas e interiores muito rasas.

No ano de 2011 foi publicado um estudo denominado “*The next generation of unmanned marine vehicles dedicated to the 50 anniversary of the human world record diving*” que revisa o histórico de desenvolvimento de veículos aquáticos não tripulados em ambientes marinhos e prospecta desenvolvimentos futuros (FENG et al., 2011). Segundo Liu et al (2022), com o surgimento e o desenvolvimento de tecnologias de inteligência artificial, as pesquisas em USV atraíram cada vez mais atenção, uma vez que este tipo de tecnologia ainda está em seus estágios iniciais e apresentam diversos desafios devido à complexidade do ambiente hídrico. Através desta constatação é notável que o crescimento constante se dá pelo aumento de desenvolvimentos científicos e tecnológicos nos USV, como também a diversificação de seu uso em outros ambientes (MU et al., 2018, ZHUANG et al., 2020, WANG et al., 2019, UCHIDA; HUNAKI, 2019, LIU et al., 2018).

A produção de estudos sobre veículos de superfície aquática não tripulados é divulgada em diversos periódicos. A Tabela 1.1 mostra o desempenho dos dez periódicos com maior acervo no período analisado.

Periódicos	Quantitativo de Publicações
Ocean Engineering	89
IEEE Access	57
Sensors (Switzerland)	38
Journal of Marine Science and Engineering	36
Ship Building of China	35
Applied Ocean Research	23
Applied Sciences (Switzerland)	20
International Journal of Advanced Robotic Systems	20
Journal of Harbin Engineering University	15
IEEE Journal of Oceanic Engineering	14

Tabela 1.1 – Quantitativo de publicações dentro da temática relacionada ao USV.

Em relação aos dez periódicos selecionados é possível verificar que os estudos tendem a ser publicados em revistas com o enfoque em pesquisa e desenvolvimento no campo da engenharia oceânica/marinha, como também eletrônica e elétrica, devido ao grande número de estudos envolvendo a criação e testes com os USV.

No portfólio foi possível identificar os autores com maior número de publicações sobre a temática (Figura 1.4).

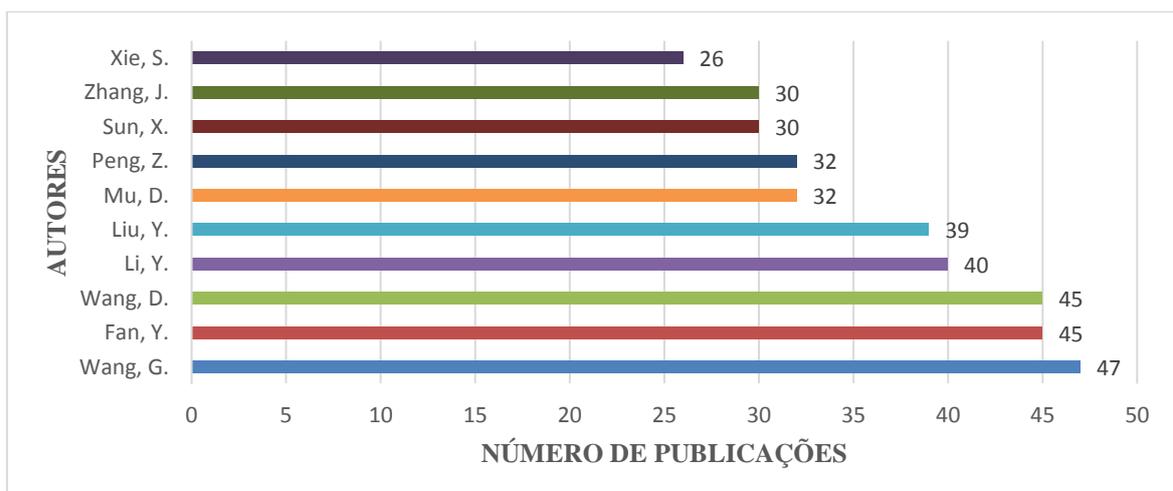


Figura 1.4 – Número de publicações por autoria dentro da temática relacionada ao USV.

O autor com maior número de publicações foi Wang, G. (47 publicações), seguido por Fan, Y. e Wang, D., ambos professores da *Dalian Maritime University* na China. Essa cooperação entre professores é facilmente verificada através do mapa de rede de co-autoria (Figura 1.5).

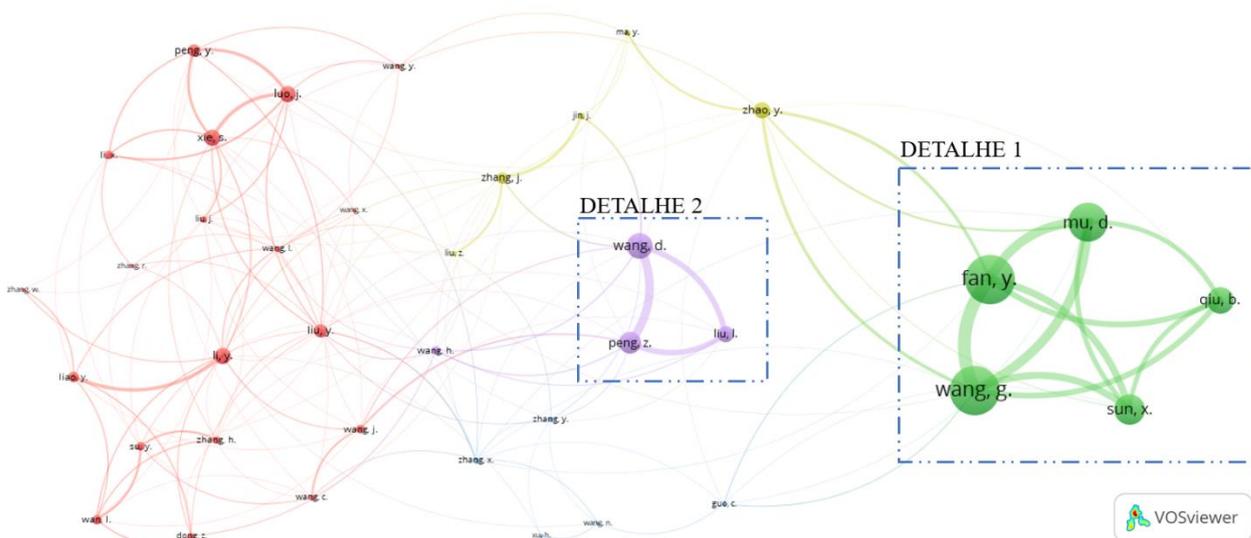


Figura 1.5 – Mapa de rede co-autoria

O detalhe 1 do mapa de co-autoria identifica uma cooperação maior entre os autores do *cluster* de cor verde, como também o tamanho dos círculos demonstra uma quantidade maior de publicações comparado ao *cluster* destacado no detalhe 2. Os autores delimitados no *cluster* verde desenvolveram diversos estudos focados em tecnologias para a criação de veículos de superfície não tripulados (USV) com recursos avançados de controle (FAN et al., 2016, QIU et al., 2019, WANG et al., 2020).

Para o mapa de palavras-chave, das 7.854 encontradas no portfólio, 219 atingiram o limite mínimo de 10 ocorrências e foram incluídas na Figura 1.6. A palavra-chave mais utilizada nas publicações, segundo o que foi encontrado no portfólio, é “*Unmanned Surface Vehicles*”, seguido pela versão no singular “*Unmanned Surface Vehicle*” e por “*Vehicles*”, algo esperado já que estes termos fazem parte da própria “*string*” de busca utilizada para este estudo, porém cabe salientar que a palavra-chave

mais recorrente dá indício de que “*Unmanned surface Vehicles*” é o termo mais comumente utilizado para a ferramenta.

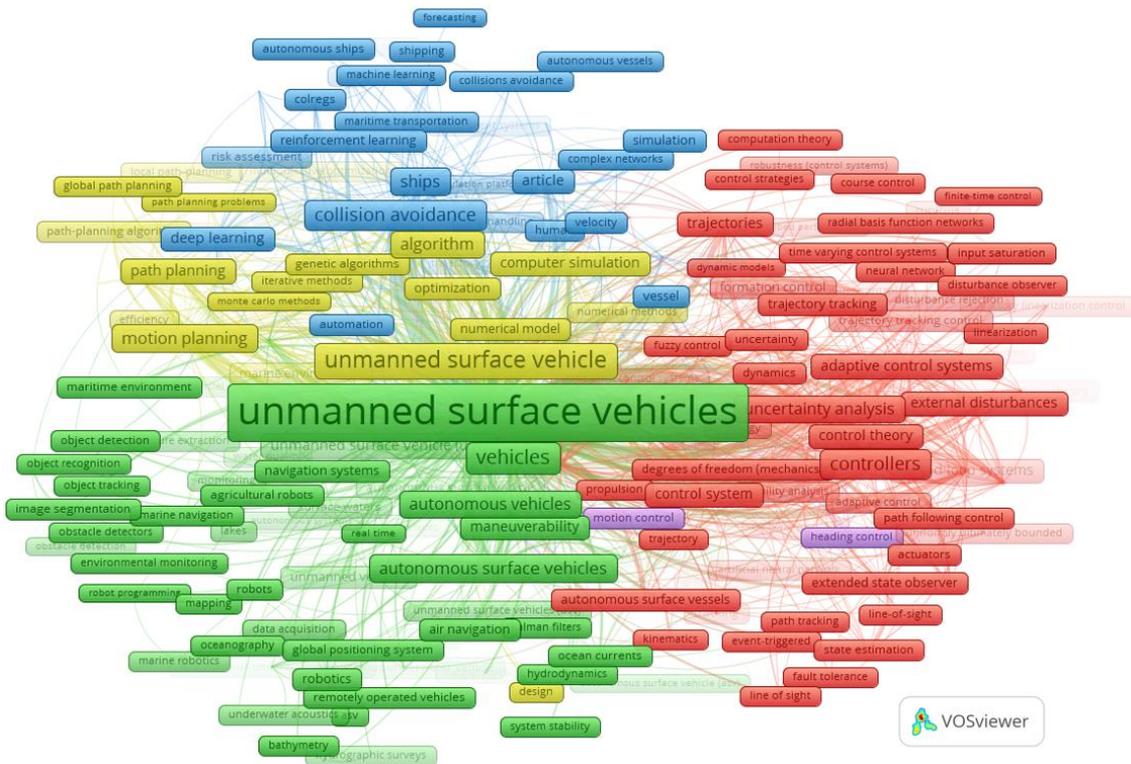


Figura 1.6 – Mapa de rede co-ocorrência de palavras-chave

Através do mapa de rede foi possível identificar que a co-ocorrência de palavras-chave no *cluster* verde está relacionada, em sua grande parte, a nomenclatura do equipamento e seus usos (batimetria, hidrodinâmica, oceanografia e mapeamento); no *cluster* vermelho, em sua totalidade, são palavras-chaves de estudos envolvendo tecnologias de controle e automação; o *cluster* amarelo remete a simulação computacional com algoritmos, enquanto o *cluster* azul engloba expressivamente estudos envolvendo navios e transportes marítimos. Na Figura 1.7 é apresentado o mapa de rede das palavras-chave relacionado com o ano de publicação dos estudos. As palavras-chave utilizadas em estudos mais recentes remetem a tecnologias para detecção de objetos e inteligência artificial (*machine learning*, *deep learning*) indicando uma forte demanda de aperfeiçoamento (MAHÉ et al., 2021, LONG et al., 2021).

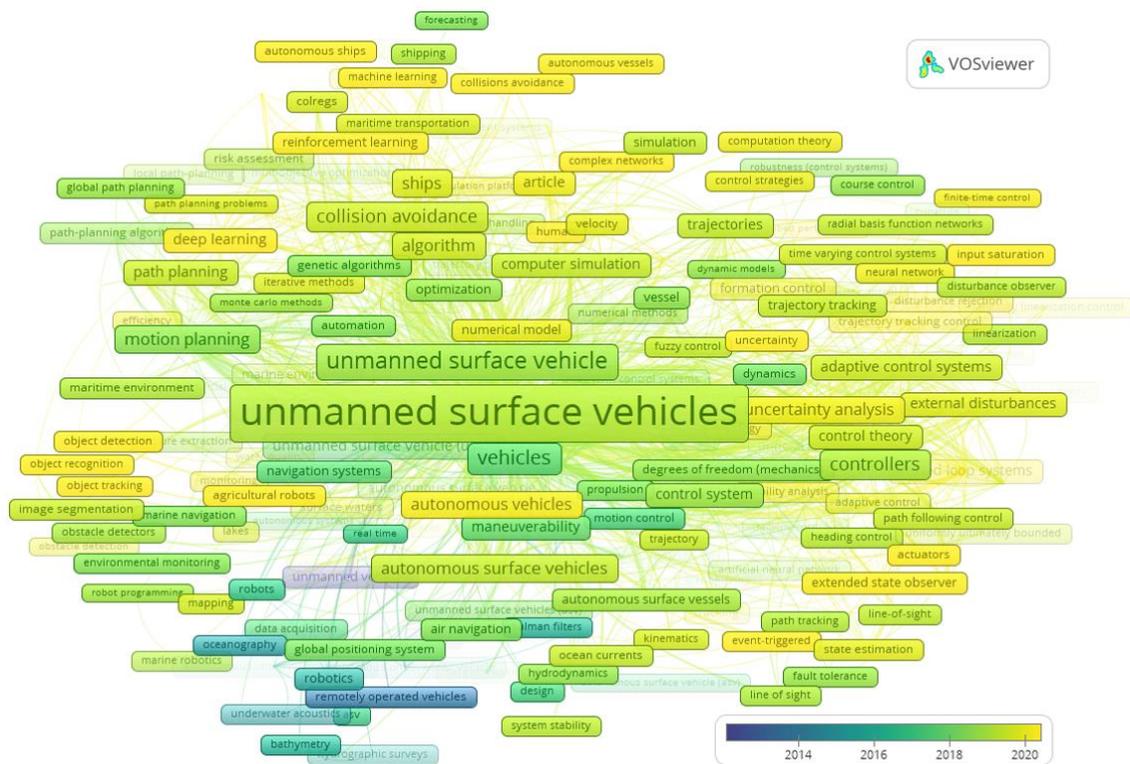


Figura 1.7 – Mapa de rede de palavras-chave por ano

Esta análise indicou que as pesquisas continuam sendo desenvolvidas para o aperfeiçoamento do equipamento, como também foi possível identificar que existem uma gama de estudos envolvendo o uso dos USV em conjunto com outros tipos de equipamentos autônomos para o monitoramento e estudos ambientais.

O estudo desenvolvido por Bella et al (2021) mostra um sistema híbrido de detecção e limpeza utilizando um Veículo Aéreo não tripulado e um Veículo de superfície não tripulado, os resultados indicaram que esse tipo de sistema híbrido pode detectar e reduzir o nível de poluição (petróleo e derrames hidráulicos) em regiões marítimas. Segundo Specht et al (2021) metodologias que utilizam a aquisição de dados através de diferentes plataformas de medição autônomas não tripuladas (aéreas e de superfície) e integram esses dados, garantem soluções para sistemas batimétricos e topográficos.

1.4. CONCLUSÃO

Este artigo buscou mapear a produção científica relacionada aos veículos de superfície aquática não tripulados (USV) para conhecer o desenvolvimento e evolução na quantidade de produções até o ano de 2021, com dados extraídos das bases de dados *Scopus* e *Web of Science*.

Com base no portfólio gerado foi possível chegar as seguintes constatações: o primeiro artigo encontrado sobre a temática é datado do ano de 2000 e o ano de maior produção científica com 340 publicações é o ano de 2021, exatamente o último ano pesquisado demonstrando um crescente interesse na produção de pesquisas relacionadas ao tema. A maioria dos estudos foram publicados em revistas com o enfoque em pesquisa e desenvolvimento no campo da engenharia oceânica/marinha, como também eletrônica e elétrica, confirmando através dos mapas de rede que as pesquisas são focadas em tecnologias para a criação de veículos de superfície não tripulados (USV) com recursos avançados de controle, e que continuam sendo desenvolvidas para o aperfeiçoamento do equipamento. O autor com maior número de publicações foi Wang, G. e muitas destas publicações foram produzidas em parceria com outros pesquisadores da *Dalian Maritime University* na China. A palavra-chave mais recorrente e também a denominação mais comum para a ferramenta é “*Unmanned Surface Vehicle*”.

Com os resultados divulgados pode-se perceber que a produção sobre o tema seguirá em crescimento por ser um assunto relativamente novo e com grandes perspectivas para o desenvolvimento de novas pesquisas, métodos e aplicações. O mapeamento de pesquisas, principalmente sobre temas ainda em evolução, é importante para aumentar a visibilidade e compreensão sobre as inovações em pesquisas. A metodologia adotada, utilizando mais de uma base de dados possibilita uma compreensão maior desta temática, trazendo visibilidade sobre inovações nesta área do conhecimento.

1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALESTRIERI, E. et al. Sensors and measurements for unmanned systems: An overview. *Sensors*, v. 21, n. 4, p. 1518, 2021.
- BELLA, S. et al. HMDCS-UV: A concept study of Hybrid Monitoring, Detection and Cleaning System for Unmanned Vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, v. 102, n. 2, p. 1-35, 2021.
- BOARD, Naval Studies et al. *Autonomous vehicles in support of naval operations*. National Academies Press, 2005.
- BRAMER, Wichor M. et al. De-duplication of database search results for systematic reviews in EndNote. *Journal of the Medical Library Association: JMLA*, v. 104, n. 3, p. 240, 2016.
- CACCIA, M., et al. Unmanned surface vehicle for coastal and protected waters applications: The charlie project. *Marine Technology Society Journal* 41(2): 62-71, 2007.
- DÍAZ-GUTIÉRREZ, C. E. et al. Design of a Teleoperated Aquatic Vehicle for the Gauging of Water Bodies. *Journal of applied research and technology*, v. 9, n. 3, p. 394-418, 2011.
- FAN, Y. S. et al. On evolutionary genetic algorithm in path planning for a USV collision avoidance. *ICIC Express Lett*, v. 10, n. 7, p. 1691-1696, 2016.
- FAYAZ, S.; PARAH, S. A.; QURESHI, G. J. Underwater object detection: architectures and algorithms—a comprehensive review. *Multimedia Tools and Applications*, p. 1-46, 2022.
- FENG, X. S. et al. The next generation of unmanned marine vehicles dedicated to the 50 anniversary of the human world record diving 10912 m. *Robot*, v. 33, n. 1, p. 113-118, 2011.
- FERREIRA, Í. O.; NETO, A. A.; MONTEIRO, C. S. O uso de embarcações não tripuladas em levantamentos batimétricos. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 10, n. 68, p. 1885-1903, 2017.
- FRANÇOLIN, C. C. et al. Optimal control of a surface vehicle to improve underwater vehicle network connectivity. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, v. 9, n. 1, p. 1-13, 2012.
- JESUS, S. M. et al. The INTIFANTE'00 sea trial: preliminary source localization and ocean tomography data analysis. In: *MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey*. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 01CH37295). IEEE, 2001. p. 40-45.
- KITTS, C. et al. Field operation of a robotic small waterplane area twin hull boat for shallow- water bathymetric characterization. *Journal of field Robotics*, v. 29, n. 6, p. 924-938, 2012.

- LEE, Y.; KIM, Y. A collision avoidance system for autonomous ship using fuzzy relational products and COLREGs. In: International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. p. 247-252.
- LIU, J. et al. Estimating Obstacle Maps for USVs Based on a Multistage Feature Aggregation and Semantic Feature Separation Network. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, v. 102, n. 1, p. 1-15, 2021.
- LIU, Y.; HE, Y.; NOGUCHI, N. Development of a collision avoidance system for agricultural airboat based on laser sensor. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, v. 44, n. 4, p. 431-439, 2018.
- LIU, Y. et al. Unmanned airboat technology and applications in environment and agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 197, p. 106920, 2022.
- LONG, Y. et al. A multi-subpopulation bacterial foraging optimisation algorithm with deletion and immigration strategies for unmanned surface vehicle path planning. *Intelligent Service Robotics*, v. 14, n. 2, p. 303-312, 2021.
- MAHÉ, A. et al. Evaluation of prioritized deep system identification on a path following task. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, v. 101, n. 4, p. 1-19, 2021.
- MANLEY, J. E. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. In: *OCEANS 2008*. IEEE, 2008. p. 1-4.
- MU, D. D; WANG, G. F; FAN, Y. S. Tracking control of podded propulsion unmanned surface vehicle with unknown dynamics and disturbance under input saturation. *International Journal of Control, Automation and Systems*, v. 16, n. 4, p. 1905-1915, 2018.
- PARAVISI, M. et al. Unmanned surface vehicle simulator with realistic environmental disturbances. *Sensors*, v. 19, n. 5, p. 1068, 2019.
- PASCOAL, A. et al. Robotic ocean vehicles for marine science applications: the european asimov project. In: *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37158)*. IEEE, 2000. p. 409-415.
- PEARSON, D. et al. High-level fuzzy logic guidance system for an unmanned surface vehicle (USV) tasked to perform autonomous launch and recovery (ALR) of an autonomous underwater vehicle (AUV). IEEE, 2014.
- PIZZANI, L. et al. A arte da pesquisa bibliográfica na busca do conhecimento. *RDBCI: Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação*, v. 10, n. 2, p. 53-66, 2012.
- QIU, B. et al. Adaptive sliding mode trajectory tracking control for unmanned surface vehicle with modeling uncertainties and input saturation. *Applied Sciences*, v. 9, n. 6, p. 1240, 2019.
- RAZERA, J. Contribuições da cienciometria para a área brasileira de Educação em Ciências. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 22, n. 3, p. 557-560, 2016.

- SILVA, I. S. et al. Development of a Trimaran ASV. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 29, p. 8-13, 2018.
- SPECHT, Mariusz et al. Concept of an Innovative Autonomous Unmanned System for Bathymetric Monitoring of Shallow Waterbodies (INNOBAT System). Energies, v. 14, n. 17, p. 5370, 2021.
- SPINAK, E. Indicadores científicos. Ciência da informação, v. 27, n. 2, 1998.
- UCHIDA, H.; HUNAKI, T. Development of a remote control type weeding machine with stirring chains for a paddy field. In: 22nd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR. 2019.
- VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. VOSviewer manual. Leiden: Univeriteit Leiden, v. 1, n. 1, p. 1-53, 2013.
- VÉLEZ-NICOLÁS, M. et al. Applications of unmanned aerial systems (UASs) in hydrology: A review. Remote Sensing, v. 13, n. 7, p. 1359, 2021.
- WANG, L. et al. State-of-the-art research on motion control of maritime autonomous surface ships. Journal of Marine Science and Engineering, v. 7, n. 12, p. 438, 2019.
- WANG, G. et al. Adaptive backstepping sliding mode tracking control for underactuated unmanned surface vehicle with disturbances and input saturation. IEEE Access, v. 9, p. 1304-1312, 2020.
- ZHAO, Y. et al. Path following optimization for an underactuated USV using smoothly-convergent deep reinforcement learning. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 22, n. 10, p. 6208-6220, 2020.
- ZHUANG, J; LUO, J; LIU, Y. A Locking Sweeping Method Based Path Planning for Unmanned Surface Vehicles in Dynamic Maritime Environments. Journal of Marine Science and Engineering, v. 8, n. 11, p. 887, 2020.

SEGUNDO CAPÍTULO: AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO PARA GERAÇÃO DE MODELOS BATIMÉTRICOS NUMÉRICOS EM RESERVATÓRIO ARTIFICIAL

Resumo: A geração de dados confiáveis de batimetria para o entendimento da dinâmica de reservatórios é fundamental importância para a manutenção da qualidade e quantidade de água disponível. Portanto, este estudo tem por objetivo comparar a eficiência dos métodos de interpolação Rede Triangular Irregular (TIN), o Inverso da Distância Ponderada (IDW), Multinível B-Spline (MBS), Spline de Placa Fina (TPS) e Krigagem Ordinária (OK), e analisar qual método apresenta melhor modelagem da superfície do reservatório artificial. No dia 06 de novembro de 2021, foram coletados 12.143 pontos batimétricos no reservatório artificial, em levantamento feito com um veículo de superfície não tripulado. Os resultados indicaram que as ferramentas de interpolação se mostram intuitivas e enriquecedoras para usuários que não dominam ferramentas geoestatísticas, como também que o método da Krigagem Ordinária (OK), com coeficiente de correlação de 0,998, se mostrou mais eficiente, com variações menos perceptíveis e representando uma superfície batimétrica uniforme. A metodologia adotada pode ser utilizada para o monitoramento contínuo de reservatórios, afim de garantir o pleno funcionamento, prevendo e evitando possíveis assoreamentos.

Palavras-chave: Barragem, Krigagem ordinária, Geoestatística, Modelo Numérico de Superfície, USV.

Abstract:

The generation of reliable bathymetry data for understanding the dynamics of reservoirs is of fundamental importance for maintaining the quality and quantity of available water. Therefore, this study aims to compare the efficiency of the interpolation methods Triangulated Irregular Network (TIN), Inverse Distance Weighted (IDW), Multilevel B-Spline (MBS), Thin Plate Spline (TPS) and Ordinary Kriging (OK), and to analyze which method presents the best modeling of the surface of the artificial reservoir. On November 6 of 2021, 12,143 bathymetric points were collected in the artificial reservoir, in a survey carried out with an unmanned surface vehicle. The results indicated that the interpolation tools are intuitive and enriching for users who do not master geostatistical tools, as well as that the Ordinary Kriging (OK) method, with a correlation coefficient of 0.998, proved to be more efficient, with less noticeable variations and representing a uniform bathymetric surface. The adopted methodology can be used for the continuous monitoring of reservoirs, in order to guarantee the full operation, predicting and avoiding possible silting.

Keywords: Dam, Ordinary Kriging, Geostatistics, Numerical Surface Model, USV.

2.1. INTRODUÇÃO

A redução da precipitação devido ao aquecimento global, o crescimento populacional e o aumento dos padrões de vida levam ao aumento do consumo de água potável, o que requer um uso mais eficaz e cauteloso dos recursos hídricos. Portanto, as fontes de água devem ser protegidas, a poluição da água deve ser evitada, as fontes de água devem ser gerenciadas e a água que não é usada deve ser armazenada em ambientes como barragens e lagos (CEYLAN et al., 2011).

Para armazenar mais água em reservatórios, barragens, lagos e lagoas, ou prevenir a poluição da água, proteger as fontes de água e estender a vida útil dessas instalações, é fundamental conhecer as condições topográficas atuais e quaisquer mudanças nas capacidades dessas instalações. Para tanto, um dos métodos de monitoramento a ser aplicado é o levantamento batimétrico preciso, que ao ser realizado periodicamente, possibilita que as mudanças na topografia do fundo da água sejam monitoradas (CEYLAN et al., 2011, ILCI et al., 2019).

O levantamento batimétrico é o processo que gera mapas com base nos dados de profundidade. Apesar de existirem várias formas de realizá-los, geralmente a batimetria é mapeada usando ecobatímetros e os conjuntos de dados de profundidade são processados para compilar cartas náuticas, mapas de relevo sombreado e modelos digitais de elevação. O ecobatímetro é um equipamento que permite a leitura de profundidades com base na velocidade que os pulsos acústicos chegam ao fundo de reservatórios e no tempo de retorno ao receptor (JAWAK et al., 2015, MARQUES et al., 2021).

Atualmente, existem diferentes métodos de interpolação na literatura que são utilizados para gerar mapas batimétricos (WU et al., 2019, BANNARI; KADHEM, 2017, HENRICO, 2021), dentre eles os métodos de interpolação espacial baseados em

amostras de profundidade coletadas, de dados topográficos e sensoriamento remoto (CURTARELLI et al., 2015).

Os métodos de interpolação espacial são desenvolvidos para tipos de dados específicos ou uma variável específica, onde os valores de um atributo em pontos não amostrados precisam ser estimados a fim de gerar dados espacialmente contínuos (LI; HEAP, 2011). De acordo com Merwade et al. (2006), esses métodos são frequentemente usados em hidrologia para interpolação de dados de elevação espalhados com o objetivo de criar modelos digitais de elevação (DEM), sendo de comum interesse para matemáticos, para fins de geometria computacional, quanto para cientistas da Terra, que utilizam interpolação de dados de altitude, temperatura, precipitação e solo.

Por existir diversos métodos de interpolação (geoestatístico e determinístico) e muitos fatores (tamanho da amostra e natureza dos dados) que afetam a estimativa de um interpolador espacial, não existe consenso sobre qual método fornece os melhores resultados, principalmente para dados batimétricos (CURTARELLI et al., 2015). Isto reflete a importância de avaliar métodos de interpolação para cada caso específico, levando em consideração suas particularidades. Portanto, este estudo tem por objetivo comparar a eficiência dos métodos de interpolação Rede Triangular Irregular (TIN), o Inverso da Distância Ponderada (IDW), Multinível *B-Spline* (MBS), *Spline* de Placa Fina (TPS) e Krigagem Ordinária (OK), e analisar qual método representa melhor a superfície batimétrica de um reservatório artificial localizado em Campo Grande/MS.

2.2. MATERIAL E METODOS

2.2.1. Área de Estudo

O ambiente aquático estudado refere-se a um reservatório artificial, em propriedade rural privada, localizada no município de Campo Grande/MS, Brasil (Figura 2.1). O reservatório artificial possui uma área total de aproximadamente 35.000 m², com profundidade de aproximadamente 2,869 m, valores máximo e mínimo de 7,018 e 0,455 m respectivamente, e está inserida na APA Municipal da Bacia do Córrego Ceroula.

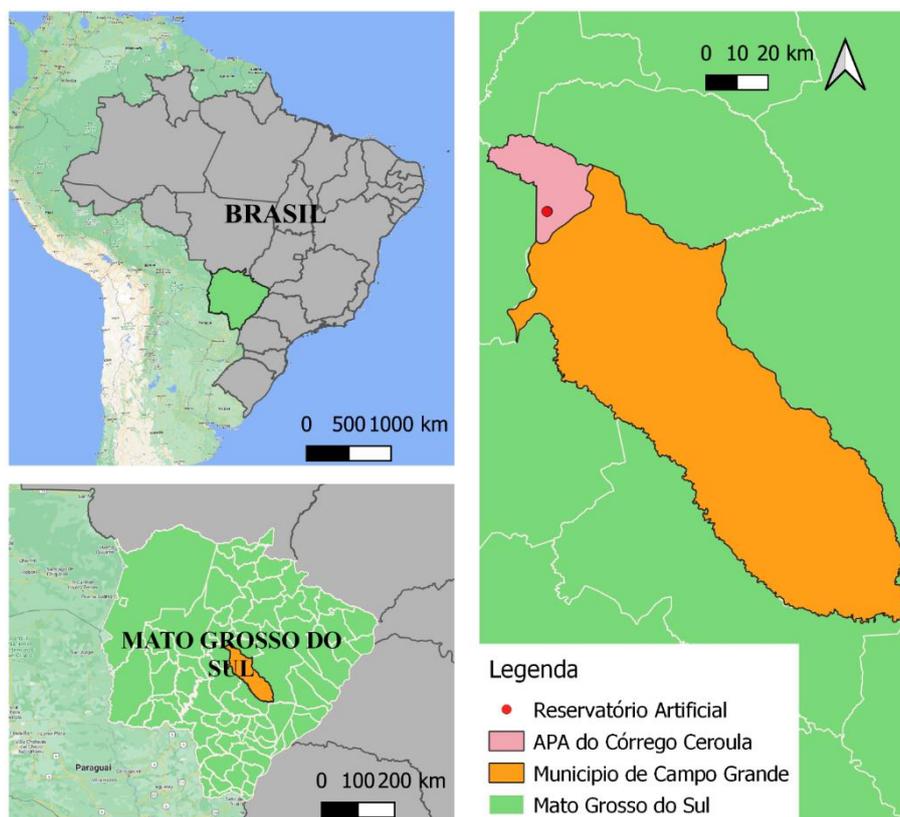


Figura 2.1. – Localização reservatório na APA do Córrego Ceroula

A Área de Proteção Ambiental (APA) é uma categoria de Unidade de Conservação de Uso Sustentável, e é representada por uma área geralmente extensa e com certo grau de ocupação humana, composta por atributos naturais que são importantes para

a qualidade de vida e o bem-estar das populações, podendo ser constituídas por terras públicas ou privadas. Essas áreas têm como objetivo a proteção da diversidade biológica, disciplina ao processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais (BRASIL, 2000).

No município de Campo Grande - MS, existem três APAs denominadas APA Guariroba, APA do Lajeado e APA do Ceroula. A APA da Bacia do Córrego Ceroula é a maior Unidade de Conservação do município, com 56.500 hectares, e é a única cujas águas segue para o Rio Paraguai, no Pantanal. Esta APA foi criada com a finalidade de recuperar, proteger e conservar os cursos d'água que compõe a bacia, devido aos desmatamentos que ocorriam na unidade, resultando na exposição do solo e sua rápida erosão, com consequências sobre o fluxo de águas, tais como assoreamento dos rios e perda da fertilidade dos solos (CAMPO GRANDE, 2020). A escolha do reservatório foi definida devido a sua inserção em Área de Proteção Ambiental.

2.2.2. Aquisição de Dados por Veículo de Superfície Não Tripulado

A primeira etapa para elaboração deste trabalho foi o levantamento batimétrico realizado no reservatório utilizando um protótipo de veículo de superfície aquática (Figura 2.2) que foi desenvolvido pela ARATER Consultoria e Projetos com a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, através de um termo de cooperação técnica. Este equipamento foi feito de PVC contendo dois motores, controladora *Raspberry* e Ecobatímetro monofeixe acoplado com GPS (MARQUES et al., 2021). Todas as especificações da construção e componentes do USV estarão descritas em Ebook (em desenvolvimento).

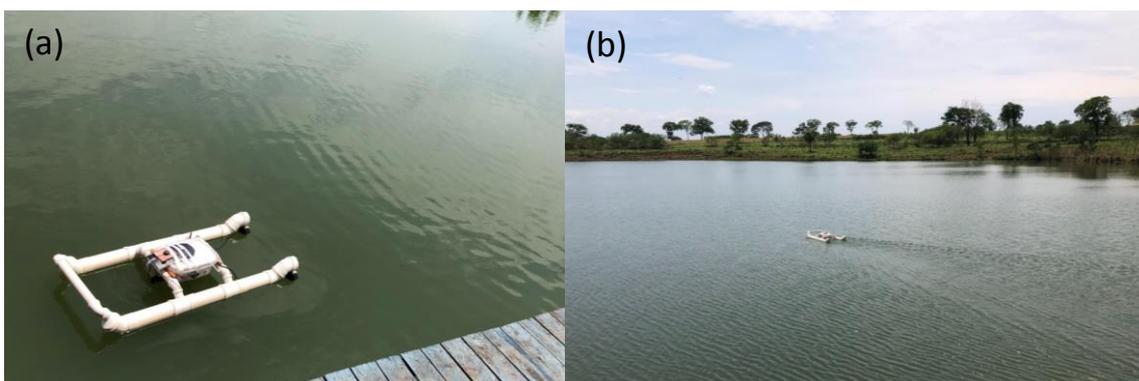


Figura 2.2 – (a) Protótipo de um USV (b) Aquisição dos dados no dia da coleta

O levantamento foi realizado no dia 06/11/2021, gerando um total de 12.143 amostras, onde para cada ponto de amostragem obteve-se as coordenadas geográficas decimais, a altitude e a profundidade em metros.

2.2.3. Procedimento Metodológico

O procedimento metodológico seguiu um fluxograma de trabalho (Figura 2.3). A partir de levantamentos batimétricos, onde foram coletados pontos da margem do reservatório com RTK e a coleta de pontos no reservatório com o USV, foram realizados ajustes em cada conjunto de dados. Nos pontos da borda, extraídos do levantamento realizado no dia 14/08/2021, foram adicionados valor de profundidade igual a 0 (zero) metros para posteriormente utilizar nos processos de interpolação.

No conjunto de pontos oriundos do USV foram realizados ajustes de erro sistemático nas profundidades amostradas. Ressalta-se que a equação de correção do erro sistemático foi elaborada com base em levantamentos feitos em piscina olímpica com medições em um conjunto de haste mais trena e comparação a dados de profundidade adquiridos com o barco, que resultou na seguinte equação:

$$y = 0,9811 \times x - 0,0259$$

Onde:

y : profundidade real corrigida, em metros;

x : profundidade aferida pelo ecobatímetro.

Após isto, foi possível definir um conjunto de dados amostrais e um conjunto de dados para posterior validação. Os dados amostrais juntamente com os dados de margem foram utilizados no processo de interpolação.

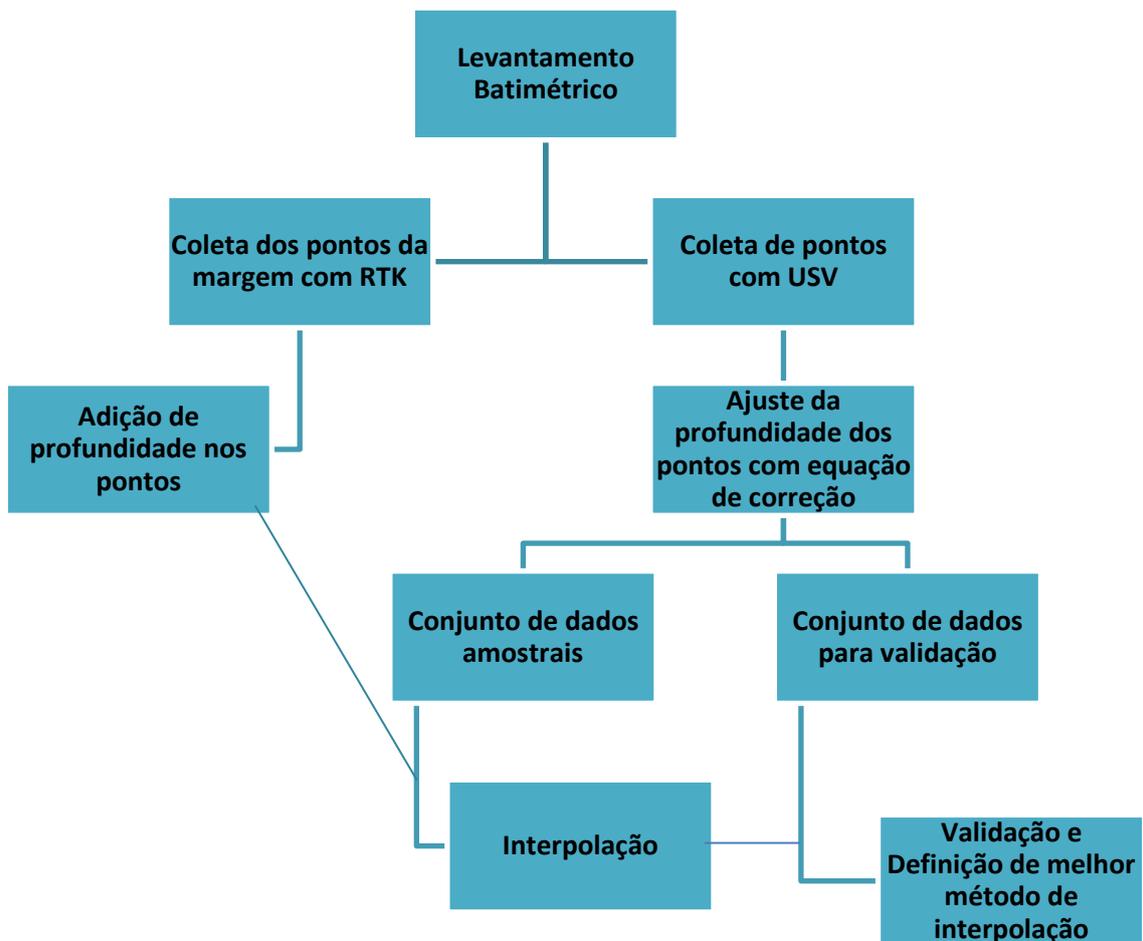


Figura 2.3 – Fluxograma de trabalho

A interpolação dos dados de amostragem teve como objetivo adquirir o dado contínuo de profundidade do reservatório, ou seja, todos os pontos de profundidade do fundo do reservatório além dos amostrados. Para tanto, nesta etapa foi realizada com o *software* livre QGIS v.3.16.12 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2021), para os métodos determinísticos através da ferramenta “interpolação de dados” e também do módulo “ferramentas de criação de raster”. Enquanto, para o método geoestatístico foi feita com a integração do *software* estatístico *Open Source R* (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013), onde foram instalados pacotes: *ggplot2*, *gstat*, *rgdal*, *sp*, *sf* e *raster*. A partir desta interação foi possível realizar as modelagens e interpolações através de scripts do R que utilizam o pacote *gstat*. A interpolação espacial foi realizada utilizando cinco métodos: a Rede Triangular Irregular (TIN), o Inverso da Distância Ponderada (IDW), Multinível *B-Spline* (MBS), *Spline* de Placa Fina (TPS) e o método geoestatístico da Krigagem Ordinária (OK).

O IDW consiste em um método de interpolação exato que estima os valores de profundidade em locais não amostrados usando uma combinação linear ponderada de valores em pontos amostrados por uma função inversa da distância do ponto de interesse aos pontos amostrados. (LI; HEAP, 2008). Através do interpolador TIN os pontos são conectados formando triângulos em que cada aresta é interpolada linearmente, ou seja, garante que cada pedaço da superfície do mosaico será contínuo, pois, a superfície de cada triângulo será definida pelas elevações dos três cantos (LIMA, 2016, EL-HATTAB, 2014). O MBI é um método que calcula uma superfície contínua por meio de um conjunto de pontos espaçados irregularmente, fazendo uma hierarquia grosseira a fina de redes de controle para gerar uma sequência de funções *B-spline* bicúbicas cuja soma se aproxima da função de interpolação desejada (LEE; WOLBERG; SHIN, 1997). Enquanto a abordagem do TPS é gerar uma superfície lisa minimamente dobrada sem a

necessidade de estimativa prévia da estrutura auto covariância espacial (DELIGIORGI; PHILIPPOPOULOS, 2011). O OK é um método geoestatístico utilizado para interpolar os valores da variável primária em locais não amostrados, bem como determinar os erros ou incertezas da superfície estimada (LI; HEAP, 2008).

Para as interpolações dos métodos determinísticos foram selecionadas a camada vetorial contendo os dados dos pontos de amostragem, o tamanho do pixel de 0,2 m, as parametrizações padrões e o método correspondente (Tabela 2.1). Na Tabela 2.2 estão presentes os parâmetros utilizados no desenvolvimento da Krigagem ordinária.

PARAMETRIZAÇÃO		INTERPOLADORES			
		TIN	IDW	MBI	TPS
	Método	Linear	-	B-spline refinement	-
	Variável			Profundidade	
	Tamanho Pixel			0,2mx0,2m	
	Peso	-	2	-	-
	Nível máx	-	-	11	-
	Erro limite	-	-	0,000100	-
	Regularização	-	-	-	0,000100
	Largura de banda de ponderação	-	130		
	Vizinhança máxima	-	40		

Tabela 2.1 – Parametrização Interpolação métodos determinísticos

PARAMETRIZAÇÃO KRIGAGEM ORDINÁRIA (OK)					
Variograma	Modelo	Campo Geométrico	Alcance	Coefficiente de contribuição	Coefficiente de correlação R ²
Omnidirecional	Gaussiano	125 m	74,1 m	0,323	0,99998

Tabela 2.2 – Parametrização Interpolação Krigagem Ordinária

Por fim, para cada dado raster interpolado realizou-se uma validação com intuito de definir qual método representa melhor a superfície batimétrica do reservatório. O processo de validação foi realizado a partir da extração dos valores de profundidade de cada raster interpolado, seguindo como referência as coordenadas dos pontos de

validação. Assim, foi possível comparar os valores do conjunto de dados da validação com os valores de profundidade estimados por cada interpolador, e obter o Erro Máximo (MaxE), Erro Mínimo (MinE), Erro Médio Absoluto (MAE), Erro Quadrático Médio (MSE) e a Raiz quadrada do erro-médio (RMSE) entre o valor estimado e o valor medido.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas descritivas dos dados batimétricos coletados no levantamento de campo podem ser visualizadas na Tabela 2.3, enquanto a Figura 2.4 mostra os pontos da rota batimétrica feita durante o levantamento com o USV e os pontos de borda com o RTK.

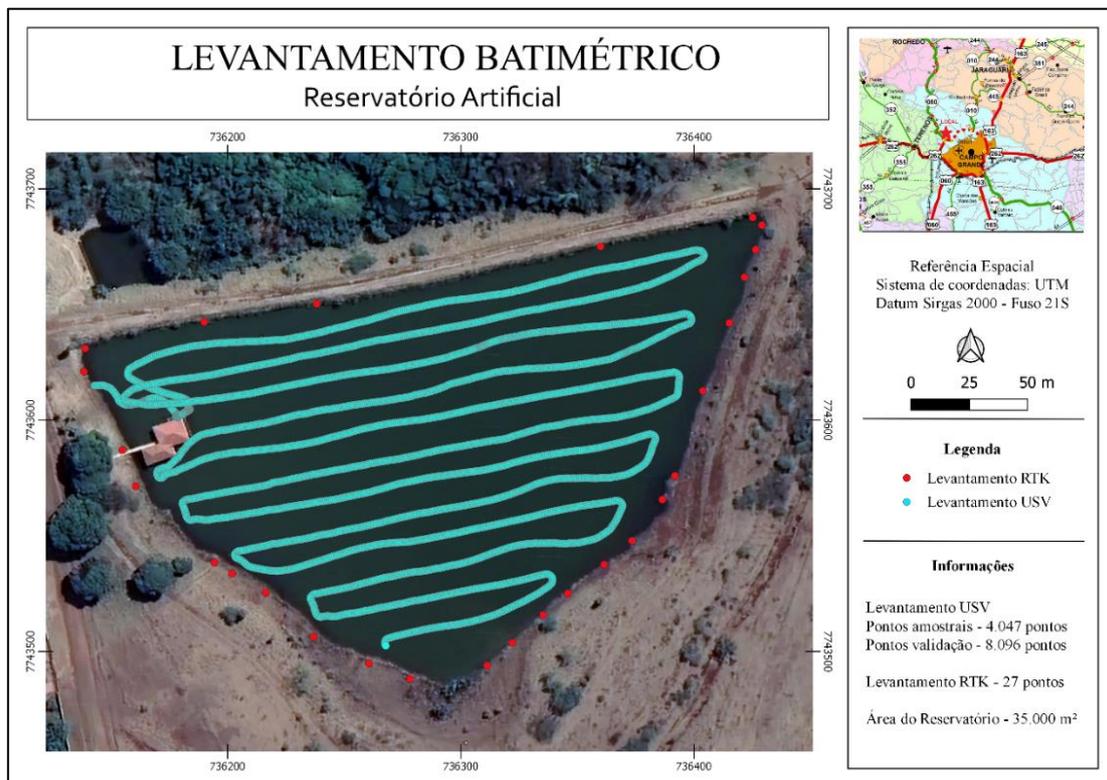


Figura 2.4. Pontos de amostragem da rota batimétrica.

Estatística	Valores	Amostra	Validação
Número de pontos coletados	12.143	4.047	8.096
1º Quartil	1,770 m	1,7597 m	1,7695 m
Mediana	2,525 m	2,525 m	2,525 m
3º Quartil	3,791 m	3,7906 m	3,7906 m
Média	2,869 m	2,8697 m	2,869 m
Desvio Padrão	1,455 m	1,455 m	1,455 m
Coefficiente de Variação	50,72 %	50,70 %	50,72 %
Profundidade Mínima	0,455 m	0,4548 m	0,4548 m
Profundidade Máxima	7,018 m	7,0086 m	7,0184 m

Tabela 2.3. Estatísticas dos dados dos pontos batimétricos coletados.

Os dados expostos apresentam uma variabilidade média, considerando os valores do desvio padrão e da média da amostra. Tal variabilidade é confirmada pelo coeficiente de variação (CV) de 50,72%, dado pela relação entre essas estatísticas.

Os 12.143 pontos coletados no levantamento apresentam uma profundidade média de 2,869 metros, com profundidades mínima e máxima encontradas de 0,455 e 7,018 metros respectivamente. Desses 4.047 pontos foram selecionados para o conjunto de dados amostrais e 8.096 pontos para o conjunto de dados de validação.

As interpolações de todos os métodos realizados neste estudo, IDW, TPS, TIN, MBS e OK são demonstradas abaixo, tornando possível visualizar tais superfícies. Na Figura 2.5 temos o resultado da interpolação com o método determinístico IDW, onde é possível verificar a tendência gerada nesse tipo de interpolação, pois em sua visualização tridimensional ficam visíveis padrões lineares na superfície, paralelos às linhas de amostragem, em decorrência do peso dado aos pontos de amostragem de profundidade.

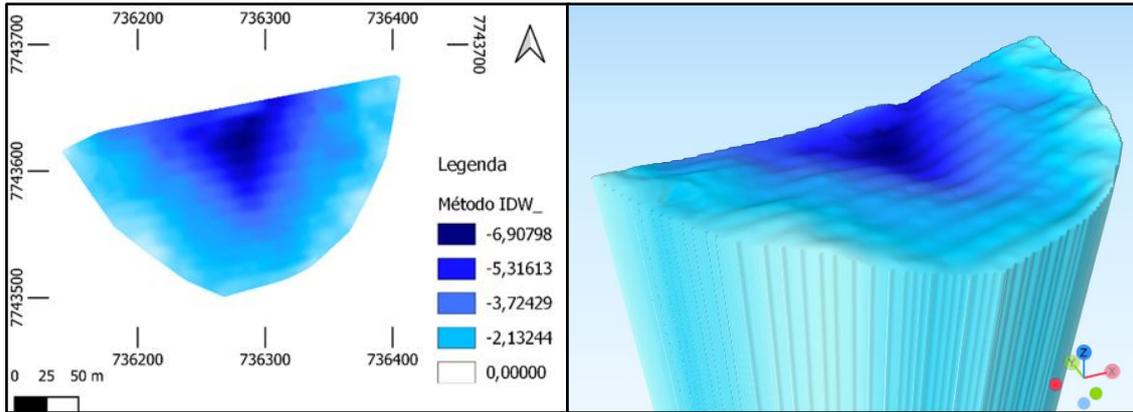


Figura 2.5. Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método IDW.

As tendências também são evidenciadas na interpolação com o método TIN (Figura 2.6), onde são visualizados triângulos e variações de superfície que não correspondem com a realidade, portanto de maneira análoga ao IDW são geradas feições lineares perpendiculares às linhas de amostragem.

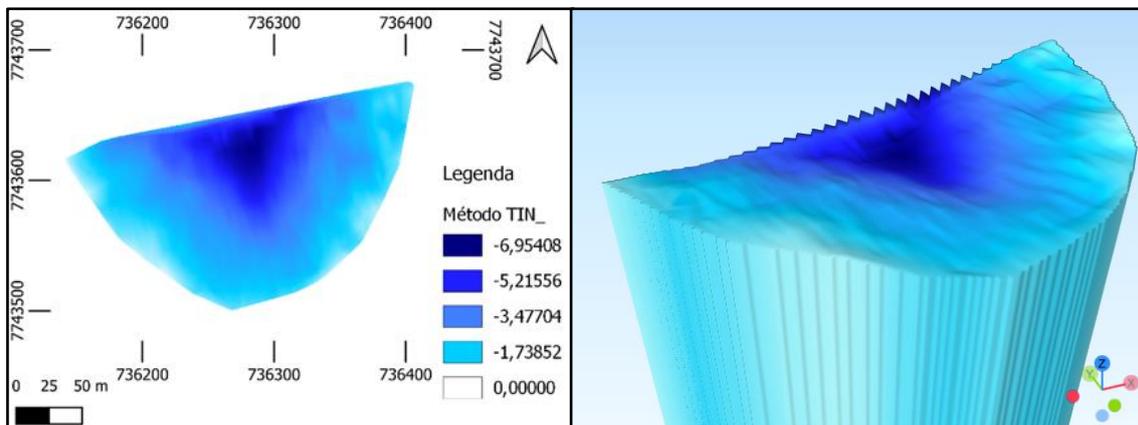


Figura 2.6. Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método TIN.

As interpolações com os métodos MBS (Figura 2.7) e TPS (Figura 2.8) geraram variações abruptas de profundidade, demonstradas através de pequenos morros nas superfícies tridimensionais, o que também pode estar relacionado com a densidade das linhas de amostragem do barco. Esses fatores mostram o quão dependente do padrão de amostragem são os métodos determinísticos que foram utilizados.

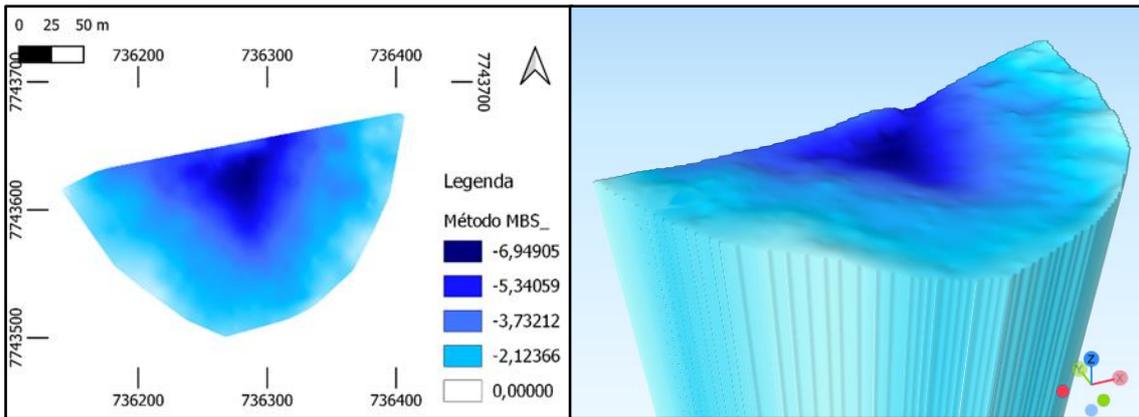


Figura 2.7. Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método MBS.

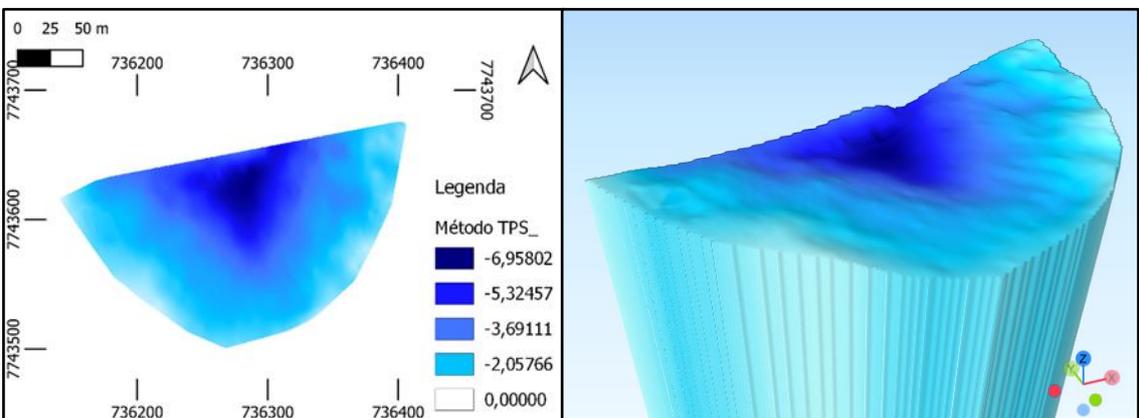


Figura 2.8. Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método TPS.

No método geoestatístico existe um fator de correção para isso na interpolação, pois um dos pesos utilizados na redução da variância do erro é relacionado com a redundância dos dados, ou seja, locais cuja densidade de amostras é maior do que em outros, reduzindo significativamente a criação de artefatos. Isto pode ser verificado na Figura 2.9, onde a Krigagem Ordinária (OK) não apresenta tendências relativas à densidade amostral resultando em uma superfície batimétrica mais suavizada.

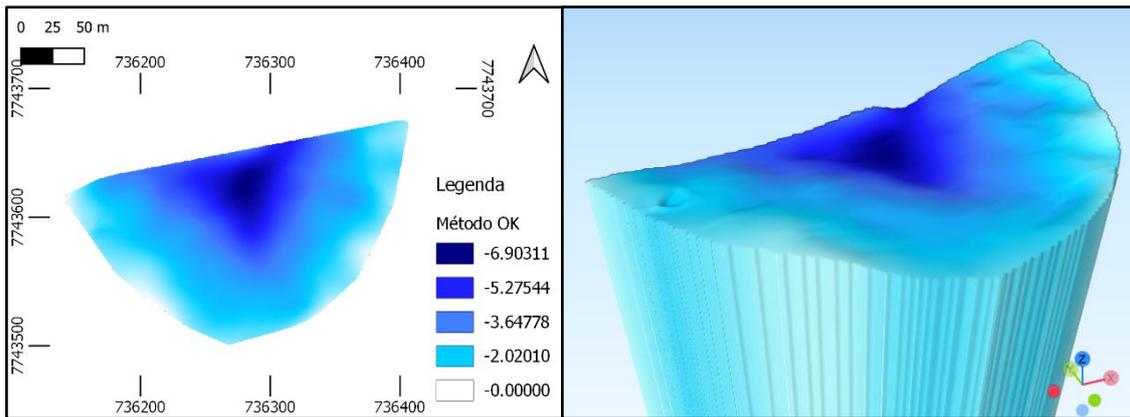


Figura 2.9. Visão Bidimensional e Tridimensional da superfície gerada pelo método OK.

Para as volumetrias estimadas (Tabela 2.4) foi possível verificar que o método TIN apresentou um menor volume enquanto o método MBS o maior.

Método de Interpolação	Volume
TIN	83.663,12 m ³
IDW	84.981,44 m ³
MBS	84.932,51 m ³
TPS	84.840,92 m ³
OK	84.581,53 m ³

Tabela 2.4. Volumes estimados para cada interpolação.

Analisando as interpolações de todos os métodos realizados neste estudo, IDW, TPS, TIN, MBS e OK, é possível verificar que houve uma diferença visual entre as interpolações apesar da capacidade dos métodos, e ao menos no que diz respeito a suavização da superfície, o método da Krigagem ordinária se mostrou mais eficiente, pois nele as variações são menos perceptíveis fazendo com que a superfície seja mais suavizada em comparação com as outras.

No estudo desenvolvido por Lubczonek et al (2021) foi considerado as melhores superfícies obtidas para os métodos de krigagem, TIN e IDW, informando que

estes métodos de interpolações testados permitem obter modelos qualitativamente semelhantes com plasticidade correta, definidos como razoabilidade visual da forma da superfície gerada. Entretanto, para este estudo, nos métodos determinísticos essas variações são mais evidentes o que é exemplificado principalmente nos métodos TIN e IDW, sendo, no último, possível visualizar linhas que coincidem com o percurso do levantamento de dados utilizados, pois este método apresenta um peso maior aos valores amostrados.

Já no estudo realizado por Curtarelli et al. (2015), onde foram feitas as interpolações utilizando dos métodos IDW, LPI, RBF e OK, todos os métodos foram capazes de mapear as feições batimétricas com resultados visualmente semelhantes, enquanto no estudo desenvolvido por Da Silva e Ferrari (2011), os mapas gerados com o método da Krigagem ordinária suavizam a distribuição espacial das interpolações quando comparado aos demais métodos, bem semelhante ao resultado encontrado neste estudo.

Através da comparação das variações entre as profundidades interpoladas por métodos determinísticos (Figura 2.10) é possível verificar que há uma maior discrepância entre o modelo IDW e as demais, onde a cor azul escuro demonstra os locais onde a profundidade do modelo foi maior do que o par comparado, e a cor vermelha demonstra as profundidades menores, por último nos locais de cores mais claras se verifica onde os valores se assemelham. Na comparação visual entre os modelos é possível verificar uma maior semelhança entre os modelos TIN e TPS.

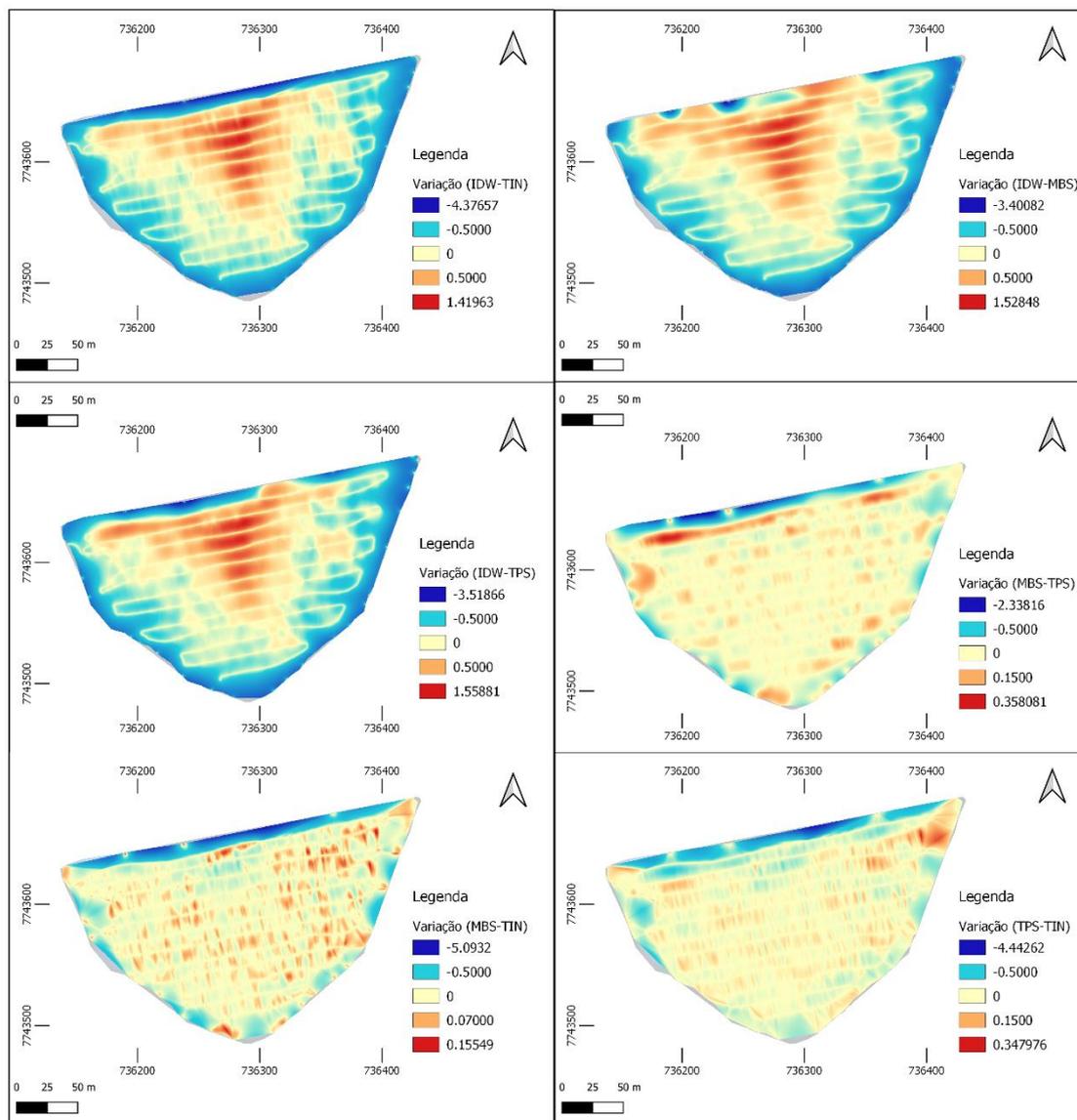


Figura 2.10. Variações entre as profundidades interpoladas (métodos determinísticos)

Ao se comparar as diferenças das profundidades através da variação entre a Krigagem e os métodos determinísticos (Figura 2.11) é possível verificar que o TIN apresentou uma maior profundidade próxima as bordas, ambos os métodos TPS e MBS tiveram uma superfície de variação que se assemelhou, porém, o TPS teve uma maior similaridade. E por último foi possível notar que o IDW possui uma discrepância maior em relação a Krigagem.

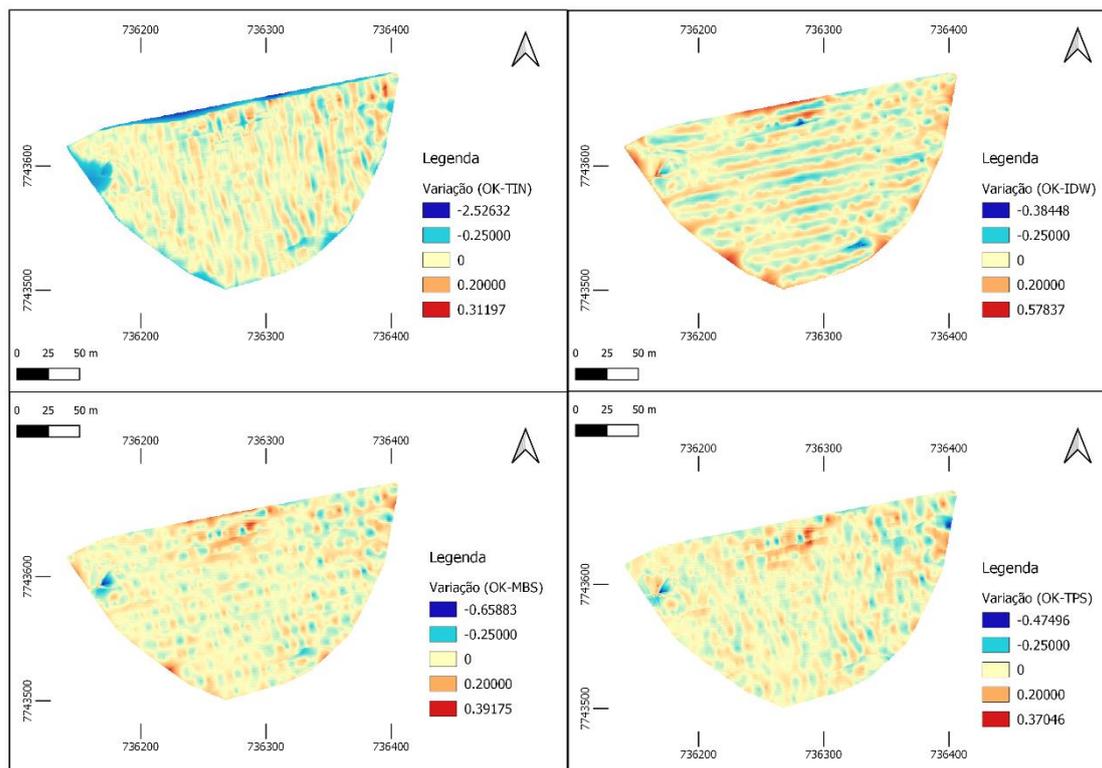


Figura 2.11. Variações entre as profundidades interpoladas (métodos determinísticos e geoestatístico)

Na Tabela 2.5 é possível verificar os valores mínimos, máximos e médios, como também o desvio padrão e a variância para os dados estimados de cada método de interpolação. Na Tabela 2.6 é indicada a validação da interpolação dos métodos determinísticos com os erros entre o valor estimado e o valor mensurado, enquanto, na Figura 2.12 é apresentada a validação cruzada da Krigagem.

Interpolação	Profundidade Mínima	Profundidade Máxima	Profundidade Média	Desvio Padrão	Variância
TIN	0,4620 m	7,0082 m	3,0020 m	1.4381 m	2,0682 m ²
IDW	0,4605 m	7,0059 m	2,9730 m	1.4509 m	2,1050 m ²
MBS	0,4448 m	7,0187 m	2,9713 m	1.4683 m	2,1558 m ²

TPS	0,3647 m	7,0151 m	2,9681 m	1.4708 m	2,1632 m ²
OK	0,3968 m	6,9144 m	2,9587 m	1.4612 m	2,1350 m ²

Tabela 2.5. Valores mínimos, máximos e médios, desvio padrão e variância para os dados estimados.

O maior valor batimétrico estimado foi de 7,0187 m pelo método MBS, enquanto o menor valor estimado foi de 0,3647 m pelo método TPS. As malhas batimétricas interpoladas tiveram uma profundidade de aproximadamente 0,36 m a 7,02 m.

Interpolação	MinE	MaxE	MAE	MSE	RMSE
TIN	~0	0,2964	0,0070	0.00013	0,0116 m
IDW	~0	0,0835	0,0085	0,00013	0,0114 m
MBS	~0	0,0927	0,0060	0,00006879	0,0083 m
TPS	~0	0,0873	0,0060	0,00006899	0,0083 m

Tabela 2.6. Erros das Interpolações com métodos determinísticos

A validação das interpolações apresentou bons resultados, todos os modelos apresentaram erros baixos, ou seja, houve pequena variação entre os valores da profundidade mensurados com os valores da profundidade previstos na interpolação. Os modelos *Spline* tanto MBS quanto TPS tiveram os menores RMSE e o modelo TIN apresentou o maior erro encontrado.

Na validação cruzada da Krigagem é possível verificar que o modelo de variograma ajustado, para esse conjunto de dados, obteve um ótimo coeficiente de correlação, visto que quanto mais próximo de 1 maior será a correlação entre o valor

medido e o previsto, sendo importante ressaltar que esta correlação se mantém para os pontos estimados dentro do alcance do modelo.

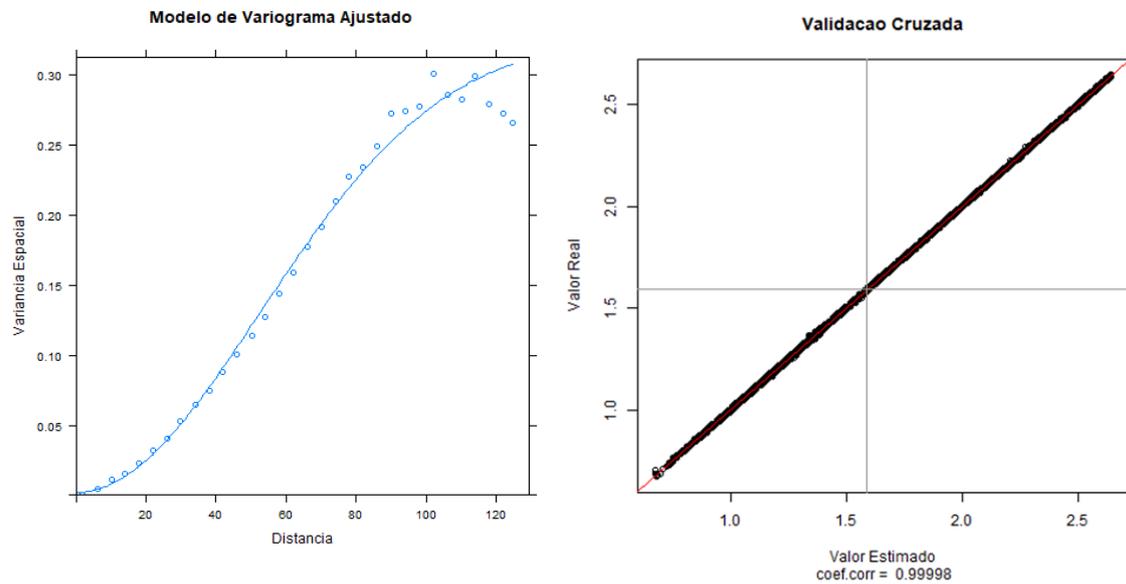


Figura 2.12 – Modelo de variograma ajustado e Validação Cruzada da Krigagem (OK)

Na Figura 2.13 é possível verificar a Krigagem de um mesmo modelo e que é importante ter o conhecimento das características da área, densidade dos pontos e também um entendimento dos fundamentos da Krigagem, porque mesmo com um modelo ajustado com boa correlação ainda é possível se gerar erros e tendências na superfície se os parâmetros não forem considerados corretamente.

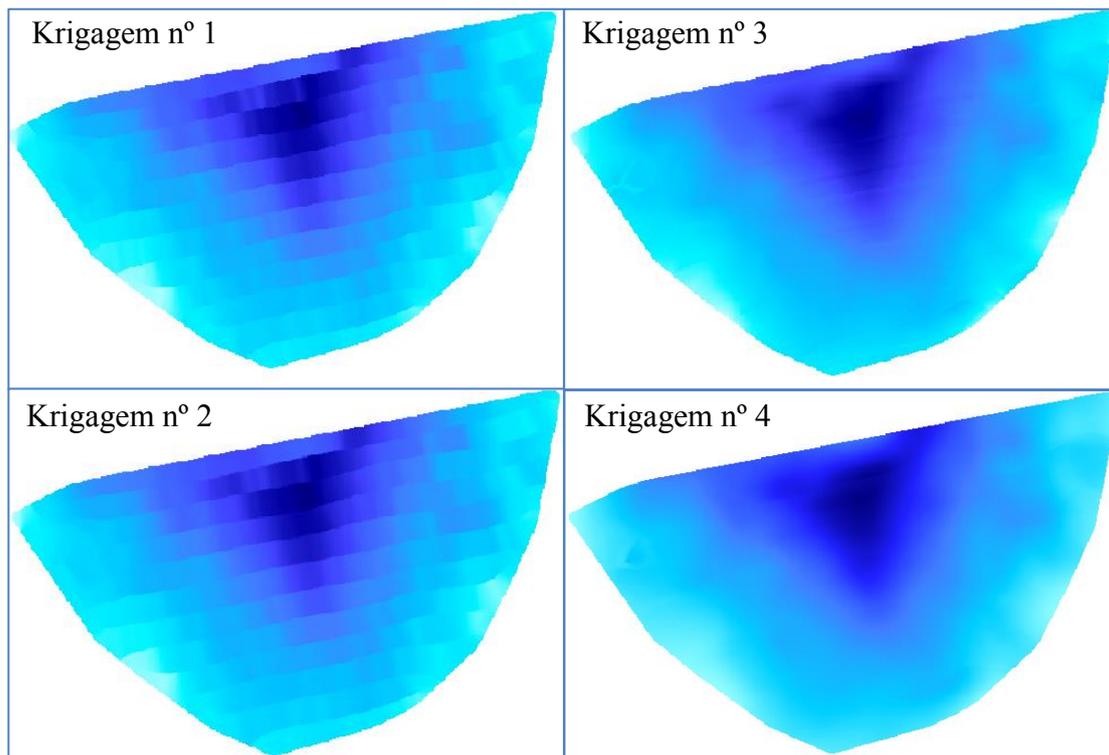


Figura 2.13 – Iterações da modelagem pela Krigagem Ordinária.

No estudo de Ferreira et al (2017), realizou-se uma batimetria contendo 706 pontos em um lago com 5,2 m de profundidade e foram comparados os métodos de Krigagem e IDW, como resultado a Krigagem apresentou os melhores resultados. Enquanto no estudo realizado por Wu et al (2019), identificou que tanto a Krigagem Ordinária quanto o RBF (Função de Base Radial) tiveram os melhores desempenhos para os modelos batimétricos em um rio.

Diante disto, através de todas as análises realizadas é notável que a interpolação gerada pelo método geoestatístico da Krigagem Ordinária (OK) obteve a melhor representação da superfície batimétrica, demonstrando de maneira eficiente a distribuição espacial das profundidades do reservatório artificial, quando comparado aos demais modelos.

2.4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram comparados a eficiência dos métodos de interpolação Rede Triangular Irregular (TIN), o Inverso da Distância Ponderada (IDW), Multinível *B-Spline* (MBS), *Spline* de Placa Fina (TPS) e Krigagem Ordinária (OK), presentes no software livre QGIS, e analisou que o método da Krigagem Ordinária representou melhor a superfície batimétrica de um reservatório artificial localizado em Campo Grande/MS.

Todos os métodos de interpolação utilizados neste trabalho foram capazes de mapear as feições batimétricas do reservatório artificial. Porém, houve divergências entre os modelos, principalmente nas avaliações qualitativas, onde os modelos determinísticos representaram uma superfície tendenciosa, enquanto o método da Krigagem ordinária se mostrou mais eficiente, pois as variações são menos perceptíveis fazendo com que sua representação da superfície seja uniforme.

Os modelos determinísticos são mais sensíveis à densidade de pontos em área (regularidade amostral), enquanto a Krigagem, por levar em conta fatores como a redundância (aglomeração de pontos), é menos sensível a essa regularidade amostral. Contudo é importante se ressaltar que uma Krigagem mal modelada, com semivariograma mal interpretado, é equivalente ao resultado de um modelo determinístico, ou seja, muito dependente da densidade em área da amostragem.

A metodologia adotada pode ser utilizada para o monitoramento contínuo de reservatórios, afim de garantir o pleno funcionamento, prevendo e evitando possíveis assoreamentos. Como sugestão para trabalhos futuros, para uma melhor representação de superfície e comparação qualitativa, se faz necessário realizar novas comparações utilizando de outros métodos de interpolação, como também testar as melhores parametrizações para cada método. Em relação as formas de comprovação dos modelos, se faz necessário a utilização de outras técnicas de validação.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANNARI, Abderrazak; KADHEM, Ghadeer. MBES-CARIS data validation for bathymetric mapping of shallow water in the Kingdom of Bahrain on the Arabian Gulf. *Remote Sensing*, v. 9, n. 4, p. 385, 2017.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza: Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000
- CAMPO GRANDE. Agência Municipal de Meio Ambiente e Planejamento Urbano - PLANURB. Plano de Manejo 2020: ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DA BACIA DO CÓRREGO CEROULA, 2020. Disponível em: <https://www.campogrande.ms.gov.br/planurb/downloads/plano-de-manejo-da-apa-do-ceroula-produto-v-versao-final/>. Acesso em: Maio 2022.
- CEYLAN, Ayhan; KARABORK, Hakan; EKOZOGLU, I. An analysis of bathymetric changes in Altinapa reservoir. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, v. 6, n. 2, p. 15-24, 2011.
- CURTARELLI, Marcelo et al. 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*, v. 4, n. 1, p. 220-235, 2015.
- DELIGIORGI, Despina; PHILIPPOPOULOS, Kostas. Spatial interpolation methodologies in urban air pollution modeling: application for the greater area of metropolitan Athens, Greece. *Advanced Air Pollution*, v. 17, p. 341-362, 2011.
- EL-HATTAB, Ahmed I. Single beam bathymetric data modelling techniques for accurate maintenance dredging. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, v. 17, n. 2, p. 189-195, 2014.
- FERREIRA, Italo Oliveira et al. In bathymetric surfaces: IDW or Kriging?. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 23, p. 493-508, 2017.
- HENRICO, Ivan. Optimal interpolation method to predict the bathymetry of Saldanha Bay. *Transactions in GIS*, v. 25, n. 4, p. 1991-2009, 2021.
- ILCI, Veli et al. Determination of reservoir sedimentation with bathymetric survey: a case study of Obruk Dam Lake. *Journal of Fresenius Environmental Bulletin*, v. 28, n. 3, p. 2305-2313, 2019.
- JAWAK, Shridhar D. et al. A synoptic review on deriving bathymetry information using remote sensing technologies: models, methods and comparisons. *Advances in remote Sensing*, v. 4, n. 02, p. 147, 2015.
- LEE, Seungyong; WOLBERG, George; SHIN, Sung Yong . Scattered data interpolation with multilevel B-splines. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, v. 3, n. 3, p. 228-244, 1997.

- LI, Jin; HEAP, Andrew D. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. 2008.
- LI, Jin; HEAP, Andrew D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, v. 6, n. 3-4, p. 228-241, 2011.
- LIMA, Francisco Gabriel Ferreira et al. Avaliação de métodos de interpolação na geração de modelos digitais de elevação de precisão em zonas costeiras de alta dinâmica sedimentar. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 68, n. 3, 2016.
- LUBCZONEK, Jacek et al. Methodology for combining data acquired by unmanned surface and aerial vehicles to create digital bathymetric models in shallow and ultra-shallow waters. *Remote Sensing*, v. 14, n. 1, p. 105, 2021.
- MARQUES, Giovana Moraes et al. Estimativa de volume de reservatório de água com software livre através de dados obtidos com embarcação remotamente pilotada. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 7, p. 3804-3813, 2021.
- MERWADE, Venkatesh M.; MAIDMENT, David R.; GOFF, John A. Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. *Journal of Hydrology*, v. 331, n. 3-4, p. 731-741, 2006.
- QGIS Development Team. QGIS versão 3.16.12 Hannover, 2021. Disponível em: <https://www.qgis.org/en/site/forusers/download.html>. Acesso em: Março 2021.
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. 2013. URL <http://www.R-project.org>.
- DA SILVA, Samuel Ferreira; FERRARI, Jéferson Luiz. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na descrição batimétricas de ambientes aquáticos. II Simpósio de Geoestatística em Ciências Agrárias. 2011
- WU, Chia-Yu et al. Comparison of different spatial interpolation methods for historical hydrographic data of the lowermost Mississippi River. *Annals of GIS*, v. 25, n. 2, p. 133-151, 2019.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado é válido, não só por atender a todos os objetivos inicialmente propostos para cada capítulo, mas também por abrir diversas possibilidades para novos estudos envolvendo o monitoramento de reservatórios artificiais, como também o contínuo mapeamento e análises cienciométricas de pesquisas envolvendo os veículos de superfície não tripulados (USV).

O uso do veículo de superfície não tripulado (USV) em estudos batimétricos, favoreceu este trabalho, por permitir de forma prática e segura a obtenção de uma quantidade robusta de dados, podendo ser indicado como uma excelente ferramenta para o monitoramento contínuo de reservatórios.

A avaliação dos métodos de interpolação Rede Triangular Irregular (TIN), o Inverso da Distância Ponderada (IDW), Multinível B-*Spline* (MBS), *Spline* de Placa Fina (TPS) e Krigagem Ordinária (OK), forneceu uma metodologia eficaz para indicar a melhor representação de uma superfície batimétrica, como também informar o melhor modelo para reservatórios artificiais com profundidades rasas.

Este estudo confirma que as pesquisas focadas no aperfeiçoamento de veículos de superfície não tripulados (USV), como também a aplicação desse equipamento para estudos ambientais continuará crescendo, visto que os resultados sempre podem ser aprimorados, assim como a metodologia pode ser aplicada em outros ambientes aquáticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAHIANE, Naima et al. Practical method proposed to estimate silting's rate in small and hillside dams. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 2014, 2014
- ALSDORF, Douglas E.; RODRÍGUEZ, Ernesto; LETTENMAIER, Dennis P. Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, v. 45, n. 2, 2007.
- ALVAREZ, Laura V. et al. Merging unmanned aerial systems (UAS) imagery and echo soundings with an adaptive sampling technique for bathymetric surveys. *Remote Sensing*, v. 10, n. 9, p. 1362, 2018
- ÁLVARES, Maria Teresa et al. Monitorização batimétrica para gestão de Albufeiras: estudo piloto. *Ix Silubesa*, 2000.
- BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, 2010.
- COOK, Christina; BAKKER, Karen. Water security: Debating an emerging paradigm. *Global environmental change*, v. 22, n. 1, p. 94-102, 2012.
- HOEKSTRA, Arjen Y.; BUURMAN, Joost; VAN GINKEL, Kees CH. Urban water security: A review. *Environmental research letters*, v. 13, n. 5, p. 053002, 2018.
- JAWAK, Shridhar D. et al. A synoptic review on deriving bathymetry information using remote sensing technologies: models, methods and comparisons. *Advances in remote Sensing*, v. 4, n. 02, p. 147, 2015.
- KIM, Seong-Woo; SEO, Seung-Woo. Cooperative unmanned autonomous vehicle control for spatially secure group communications. *IEEE Journal on selected areas in communications*, v. 30, n. 5, p. 870-882, 2012.
- LI, Yao et al. A high-resolution bathymetry dataset for global reservoirs using multi-source satellite imagery and altimetry. *Remote Sensing of Environment*, v. 244, p. 111831, 2020.
- LIU, Zhixiang et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*. 41. 2016
- MORGADO, Michele Nunes. Modelagem, Identificação e Simulação da Dinâmica de um Pequeno Veículo Flutuante. 82f. Projeto Final (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- NAÇÕES UNIDAS. Resolução adotada pela Assembleia Geral em 11 de setembro de 2015. A/RES/69/315 15 de setembro de 2015. Nova York: Nações Unidas, 2015.

- PAHL-WOSTL, Claudia et al. From applying panaceas to mastering complexity: toward adaptive water governance in river basins. *Environmental Science & Policy*, v. 23, p. 24-34, 2012.
- ROWLEY, Jack. Autonomous unmanned surface vehicles (USV): A paradigm shift for harbor security and underwater bathymetric imaging. In: *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*. IEEE, 2018. p. 1-6.
- SPECHT, Mariusz et al. Assessment of the steering precision of a hydrographic Unmanned Surface Vessel (USV) along sounding profiles using a low-cost multi-Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver supported autopilot. *Sensors*, v. 19, n. 18, p. 3939, 2019.
- YOUNG, Sera L. et al. Perspective: the importance of water security for ensuring food security, good nutrition, and well-being. *Advances in Nutrition*, 2021.