



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

**DINÂMICA DOS BANCOS DE AREIA E NAVEGABILIDADE DA HIDROVIA DO  
TAPAJÓS NO TRECHO ENTRE ITAITUBA E AVEIRO /PARÁ**

**RAIMUNDA JOSINETE DA SILVA LOUREIRO MÁCOLA**

**BELÉM-PA**

**2024**

RAIMUNDA JOSINETE DA SILVA LOUREIRO MÁCOLA

**DINÂMICA DOS BANCOS DE AREIA E NAVEGABILIDADE DA HIDROVIA DO  
TAPAJÓS NO TRECHO ENTRE ITAITUBA E AVEIRO /PA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval.

Orientador: Dr. Hito Braga de Moraes

Coorientador: Dr. Maamar El Robrini

BELÉM-PA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)

---

D111d DA SILVA LOUREIRO MACOLA, RAIMUNDA JOSINETE.  
DINÂMICA DOS BANCOS DE AREIA E  
NAVEGABILIDADE DA HIDROVIA DO TAPAJÓS NO  
TRECHO ENTRE ITAITUBA E AVEIRO /PARÁ : DINÂMICA  
DOS BANCOS DE AREIA E NAVEGABILIDADE /  
RAIMUNDA JOSINETE DA SILVA LOUREIRO MACOLA,  
RAIMUNDA JOSINETE DA SILVA. — 2024.  
110 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Hito Braga de Moraes  
Coorientador(a): Prof. Dr. Maamar El Robrini  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Naval, Belém, 2024.

1. Dinâmica fluvial, Bancos de areia, Rio Tapajós. 2.  
instagram. 3. UFPA. I. Título.

CDD 386

---

RAIMUNDA JOSINETE DA SILVA LOUREIRO MÁCOLA

**ESTUDO DA DINÂMICA DOS BANCOS DE AREIA E NAVEGABILIDADE DA  
HIDROVIA DO TAPAJÓS NO TRECHO ENTRE ITAITUBA E AVEIRO /PA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval.

Aprovada em 21 de outubro de 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente



**HITO BRAGA DE MORAES**

Data: 18/11/2024 17:40:42-0300

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

Prof. Dr. Hito Braga de Moraes - Orientador

**I Universidade Federal do Pará**

Documento assinado digitalmente



**MAAMAR EL ROBRINI**

Data: 20/11/2024 07:30:27-0300

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

Prof. Dr Maamar El Robrini - Coorientador

**Universidade Federal do Pará**

Documento assinado digitalmente



**NELIO MOURA DE FIGUEIREDO**

Data: 19/11/2024 22:26:36-0300

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

Prof, Dr Nélio Moura de Figueiredo – Membro Interno

**Universidade**

Documento assinado digitalmente



**SUSANA BEATRIZ VINZON**

Data: 20/11/2024 17:20:46-0300

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

Prof. Dra Susana Beatriz Vinzón - Membro Externo

**Universidade Federal do Rio de Janeiro**

Documento assinado digitalmente



**TEODOSIO DAS NEVES MILISSE NZUALO**

Data: 21/11/2024 11:27:16-0300

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

Prof. Dr Teodósio das Neves Milisse Nzualo – Membro Externo

**Universidade Federal do Rio de Janeiro**

Belém-PA

2024

Dedico esta dissertação à minha mãe, cuja coragem e simplicidade, ao longo de sua vida, serviram como um exemplo inspirador. Com muito carinho e amor, ela me ensinou o caminho da justiça e da luta pelos ideais. Dedico também ao meu filho Kauã e ao meu esposo, que foram fontes constantes de inspiração e apoio. Agradeço a todos que estiveram ao meu lado e contribuíram para meu crescimento e aprendizado.

## AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação de mestrado representa a concretização de um sonho que jamais seria possível sem o apoio, incentivo e colaboração de tantas pessoas ao longo desta jornada.

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança para enfrentar e superar todos os desafios. Sua presença iluminou cada passo desta caminhada.

Minha profunda gratidão vai ao meu orientador, Dr. Hito Braga de Moraes, por sua paciência, orientação e constante dedicação. Suas valiosas sugestões e vasta experiência foram cruciais para moldar esta dissertação e expandir meus horizontes. Ao meu coorientador, Dr. Maamar El Robrini, expresso meu mais sincero agradecimento por seu inestimável apoio técnico e pelas contribuições decisivas para o desenvolvimento deste trabalho. Sua generosidade em compartilhar conhecimentos, sua disponibilidade contínua e os preciosos insights que ofereceu ao longo desta trajetória elevaram significativamente a qualidade deste estudo e foram essenciais para o seu sucesso.

À minha família, meu porto seguro, dedico um agradecimento especial. Ao meu esposo, Gilberto Mácola, e ao meu filho, Kauã Fayal, pelo amor incondicional, compreensão e apoio inestimável. Aos meus pais, Maria de Fátima e Sandoval, sou eternamente grata pela confiança e suporte em cada momento dessa jornada.

Meus sinceros agradecimentos também vão para os colegas e amigos que, com palavras de incentivo, discussões enriquecedoras e, acima de tudo, com a amizade, tornaram essa caminhada muito mais leve e significativa.

Aos técnicos e colaboradores que me assistiram durante a coleta de dados em campo, minha gratidão pela dedicação e comprometimento. Sem o valioso auxílio de vocês, o trabalho de campo teria sido consideravelmente mais desafiador.

Agradeço, ainda, ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) – Superintendência Regional no Estado do Pará, e à empresa Cartografia, Hidrografia e Digitalização de Mapas LTDA (CHD), pelo suporte técnico, financeiro e logístico indispensável à realização deste estudo.

Por fim, dedico este trabalho a todos que acreditaram no meu potencial e, de alguma forma, fizeram parte da minha caminhada acadêmica. Cada um de vocês foi uma peça fundamental para que eu chegasse até aqui.

## RESUMO

A ocorrência e migração de bancos de areia no Rio Tapajós têm o potencial de influenciar a navegabilidade e a segurança da navegação fluvial, tornando crucial a compreensão da formação e dinâmica dessas estruturas. A hidrovia é estratégica para o transporte fluvial na região, e compreender essa dinâmica é essencial para garantir a segurança da navegação e a eficiência do transporte, especialmente em função das variações sazonais e eventos extremos. Esta dissertação de mestrado investiga a influência sazonal do regime hidrológico, da geometria do leito e da interação com afluentes na formação de bancos de areia no trecho entre Itaituba e Aveiro (Pará), e suas implicações para a navegabilidade. A metodologia incluiu a coleta de dados de levantamento batimétrico de feixe único realizado em 2023, comparados com dados históricos da Carta Náutica de 1982. Os resultados revelam uma significativa movimentação dos bancos de areia e mudanças na geomorfologia dos canais, com uma taxa média de migração variando entre 15,85 e 48,78/ano. Alguns bancos, como o próximo a Fordlândia, continuam a crescer. A movimentação dos canais segue padrões meandrantés típicos de planícies fluviais. A navegabilidade melhora com o aumento do nível do rio, sendo viável de janeiro a maio para embarcações com calado de 3,5 m. A comparação dos dados de 1982 (Carta Náutica) e de 2003 (levantamentos batimétricos) 2023, mostra que as áreas navegáveis são semelhantes em períodos de níveis altos do rio, embora haja variações metodológicas que impactam a precisão das cartas. Esses resultados contribuirão para o desenvolvimento de estratégias de gestão e para a tomada de decisões que visem tornar a navegação mais segura. O estudo preenche uma lacuna no conhecimento científico, fornecendo dados concretos sobre a dinâmica fluvial e suas implicações para a hidrovia do Tapajós.

**Palavras-chave:** Dinâmica fluvial, Bancos de areia, Rio Tapajós, Geomorfologia fluvial, Navegação fluvial.

## ABSTRACT

The occurrence and migration of sandbanks in the Tapajós River have the potential to influence navigability and the safety of river navigation, making it crucial to understand the formation and dynamics of these structures. The waterway is strategic for river transport in the region, and understanding this dynamic is essential to ensure navigation safety and transport efficiency, especially due to seasonal variations and extreme events. This master's thesis investigates the seasonal influence of the hydrological regime, the riverbed geometry, and the interaction with tributaries on the formation of sandbanks in the stretch between Itaituba and Aveiro (Pará), and their implications for navigability. The methodology included the collection of single-beam bathymetric survey data conducted in 2023, compared with historical data from the Nautical Chart of 1982. The results reveal significant movement of the sandbanks and changes in the geomorphology of the channels, with an average migration rate varying between 15.85 and 48.78 meters per year. Some sandbanks, such as the one near Fordlândia, continue to grow. The movement of the channels follows meandering patterns typical of floodplains. Navigability improves with rising river levels, being feasible from January to May for vessels with a draft of 3.5 meters. The comparison of data from 1982 (Nautical Chart) and 2003 (bathymetric surveys) with 2023 shows that navigable areas are similar during periods of high river levels, although there are methodological variations that impact the accuracy of the charts. These results will contribute to the development of management strategies and decision-making aimed at making navigation safer. The study fills a gap in scientific knowledge, providing concrete data on river dynamics and its implications for the Tapajós waterway.

**Keywords:** Fluvial dynamics, Sand banks, Tapajós River, Fluvial geomorphology, Fluvial navigation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da Hidrovia do Rio Tapajós entre os municípios de Itaituba a Santarém estado do Pará .....	27
Figura 2 – Carta náutica (nº 4382B) Exibição de bancos de areia no Rio Tapajós. ....	28
Figura 3 – Mapa batimétrico /2023 – Trecho próximo a Barreiras.....	29
Figura 4 – Região de estudo do Rio Tapajós, entre Itaituba e Aveiro. ....	30
Figura 5 – Terminais de grão de Miritituba em Itaituba, Rio Tapajós. Vista aérea do Google Earth de 2023, do município de Itaituba, dos terminais e das barcaças.....	32
Figura 6 – Terminais de grãos de Miritituba em Itaituba, Rio Tapajós .....	32
Figura 7 – Bacia do Rio Tapajós. ....	35
Figura 8 – Valores de precipitação média mensal para a região de estudo no baixo rio Tapajós a partir da série histórica dos anos de 1977 a 2017.....	37
Figura 9 – Tipos de solo da bacia do Rio Tapajós .....	44
Figura 10 – Uso do solo na bacia do Rio Tapajós.....	45
Figura 11 – Mapa de isoietas da bacia do Rio Tapajós.....	46
Figura 12 – Máximas e mínimas de cota e vazão no Rio Tapajós, para o período entre 1975 e 1995.....	47
Figura 13 – Imagem aérea do encontro das águas do Rio Tapajós com as águas do Rio Amazonas .....	48
Figura 14 – Tipo de embarcações para acesso Hidroviário na área de Estudo .....	52
Figura 15 – Fluxograma da Metodologia Adotada no Estudo.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 16 – Testes do DGPS para a verificação da precisão da posição. ....	54
Figura 17 – Fotos dos equipamentos utilizado no levantamento batimétrico monofeixe:.....	55
Figura 18 – Ilustração dos <i>offsets</i> da embarcação de levantamento batimétrico. ....	56
Figura 19– Disposições do sistema monofeixe instalado a bordo da lancha de 40 Hp, utilizada durante a campanha. ....	56
Figura 20 – Notebooks próximo ao comando da embarcação e DGPS .....	57
Figura 21 – <i>Draft</i> inserido no ecobatímetro. ....	57
Figura 22 – Procedimento de calibração do ecobatímetro pelo método da placa arriada. ....	58
Figura 23 – Linhas de calibração inicial e final dos levantamentos batimétricos.....	59
Figura 24 – Mapa Batimétrico realizado em 2023 no rio Tapajós, no trecho coincidente com a CN 4382B (Itaituba até Barreiras). ....	66
Figura 25 – Digitalização da Carta Náutica 4382B no rio Tapajós, no trecho entre Itaituba até Barreiras. ....	67
Figura 26 – Modelos de Elevação digital gerado a partir dos dados da CN 4382B (Itaituba até Barreiras). ....	67
Figura 27 – Modelos de Elevação digital da Batimetria de 2023 gerado no trecho coincidente com a CN 4382B (Itaituba até Barreiras). ....	68
Figura 28 – Mapa do levantamento batimétrico/2023 e Carta Náutica/1982 (CN 4382B) - Balanço sedimentar na área de estudo. Tons de azul indicam Erosão, enquanto tons de vermelho indicam Assoreamento.....	69

Figura 29 – Mapa do Balanço sedimentar na área de estudo em sobreposição à Carta Náutica (CN 4382B). Tons de azul indicam erosão, enquanto tons de vermelho indicam assoreamento.	70
Figura 30 – Mapa de localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382B e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.	73
Figura 31 – Superposição do Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023 (Perfil Norte).	74
Figura 32 – Superposição Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023 (Perfil Sul).	74
Figura 33 – Mapa de Localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382B e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.	75
Figura 34 – Superposição dos Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023.	76
Figura 35 – Mapa de localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382B e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.	78
Figura 36 – Superposição Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023.	79
Figura 37 – Mapa de localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382B e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.	80
Figura 38 – Superposição de Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023.	81
Figura 39 – Mapa de localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382B e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.	82
Figura 40 – Superposição de Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023.	83
Figura 41 – Mapa de localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382A e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.	84
Figura 42 – Superposição de Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023.	85
Figura 43 – Avaliação da proporcionalidade entre as áreas disponíveis para navegação a depender do nível do rio Tapajós para uma embarcação com demanda de 9 m de calado.	90
Figura 44 – Avaliação da proporcionalidade entre as áreas disponíveis para navegação a depender do nível do rio Tapajós para uma embarcação com demanda de 4 m de calado.	92
Figura 45 – Avaliação da proporcionalidade entre as áreas disponíveis para navegação a depender do nível do rio Tapajós para uma embarcação com demanda de 3 m de calado.	94
Figura 46 – Impactos Financeiros nos Períodos de Seca na Hidrovia do Tapajós	97
Figura 47 – Cronograma de trabalho para a defesa da Dissertação.	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nível de rio e navegabilidade para uma embarcação com calado de 9 m .....	87
Tabela 2 – Nível de rio e navegabilidade para uma embarcação com calado de 3 m .....	88
Tabela 3 – Área navegável para cada nível do rio no calado de 9 m .....	89
Tabela 4 – Áreas navegáveis para cada nível do rio no calado de 4 m .....	91
Tabela 5 – Área navegável para cada nível do rio no calado de 3 m .....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ANTAQ</b>	Agência de Transportes Aquaviários
<b>ACP</b>	Análise de Componentes Principais
<b>CHM</b>	Centro de Hidrografia da Marinha
<b>DGPS</b>	GPS Diferencial
<b>EN</b>	El Niño
<b>GNSS</b>	Sistema Global de Navegação por Satélite
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamento Global
<b>LH</b>	Levantamento Hidrográfico
<b>LN</b>	La Niña
<b>MCs</b>	Microcistinas
<b>RRNN</b>	Referências de Níveis
<b>UFOPA</b>	Universidade Federal do Oeste do Pará

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 Motivação e justificativa .....	12
1.2 Hipótese.....	14
1.3 Estrutura da dissertação .....	14
1.4 Objetivos .....	16
1.4.1 Objetivos geral.....	16
1.4.2 Objetivos específicos.....	16
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1 Conceitos básicos sobre bancos de areia fluviais .....	17
2.2 Importâncias dos bancos de areia para a geomorfologia fluvial .....	19
2.3 Influências dos bancos de areia na hidrodinâmica do rio .....	21
2.4 Estudos sobre a dinâmica dos bancos de areia .....	23
<b>3. ASPECTOS GERAL DO PROBLEMA .....</b>	<b>27</b>
<b>4. CARACTERIZAÇÕES DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>30</b>
4.1 Bacias hidrográficas do Rio Tapajós .....	34
4.2 Clima.....	36
4.3 Parâmetros Meteorológicos .....	38
4.3.1 Temperaturas do ar .....	38
4.3.2 Precipitações .....	39
4.3.3 Ventos .....	40
4.4 Aspectos Geológicos .....	42
4.5 Tipos de Solos .....	43
4.6 Condições hidrológicas .....	46
4.7 Condições Ambientais .....	48
4.8 Logísticas.....	51
<b>5. METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
5.1 Procedimentos Pré-Coleta de Dados .....	54
5.1.1 Testes de Precisão dos Equipamentos DGPS .....	54
5.2 Aquisições dos dados de campo .....	54
5.2.1 Levantamentos batimétrico monofeixe .....	54
5.3 Processamento de dados do levantamento batimétrico com monofeixe .....	60
5.4 Digitalizações da Carta Náutica de 1982.....	61
5.5 Análise Comparativa do Levantamento batimétrico/2023 com as Cartas Náuticas/1982 .....	62
5.6 Interpolação por meio do método geoestatístico de Krigagem .....	63
5.6.1 Processo de interpolação por Krigagem:.....	63
5.7 Análise e Interpretação dos Resultados .....	65
5.7.1 Validação do Modelo de Interpolação.....	65
5.7.2 Mapeamento e Distribuição Espacial dos Dados Interpolados.....	65
5.7.3 Impactos na Navegabilidade.....	65
5.7.4 Relações com o Regime Hidrológico.....	66
5.7.5 Metodologia da Dinâmica sedimentar ao longo prazo .....	68

<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>71</b>
6.1 Variações batimétrica e migração de bancos .....	71
6.1.1 Movimentação do Banco de Areia na Região de Itaituba .....	71
6.1.2 Movimentação do banco de areia localizado a jusante da ilha à frente de Miritituba ...	75
6.1.3 Movimentação do banco localizado a montante de Barreiras.....	77
6.1.4 Movimentação do Banco de Areia no Canal próximo a Barreiras.....	79
6.1.5 Movimentação do Banco de Areia na Região Entorno de Fordlândia .....	81
6.1.6 Movimentação do Banco de Areia na Região Entorno de Aveiro .....	83
6.1.7 Diagnóstico da Movimentação dos Bancos de Areia.....	85
6.2 Navegabilidades na hidrovia do Tapajós no trecho Itaituba a Aveiro.....	86
6.3 Navegabilidades na hidrovia do Tapajós.....	88
6.3.1 Navegabilidade para Embarcação com Calado de 9 m.....	88
6.3.2 Navegabilidade para embarcação com calado de 4 m .....	91
6.3.3 Navegabilidade para embarcação com calado de 3 m .....	93
6.4 Diagnósticos da navegabilidade .....	95
6.4.1 Impacto das Dimensões dos Canais na Manutenção e Navegabilidade .....	96
6.5 Impacto Econômico da Seca na Hidrovia do Tapajós .....	97
6.5.1 Impacto das Dimensões dos Canais na Manutenção e Navegabilidade .....	97
<b>7. DISCUSSÕES .....</b>	<b>98</b>
<b>8. CONCLUSÕES.....</b>	<b>100</b>
<b>9. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>101</b>
<b>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>103</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A Hidrovia do Tapajós, situada no estado do Pará (Brasil), é uma rota fluvial estratégica que desempenha um papel vital no transporte e na integração regional da Amazônia. Parte do sistema hidroviário da Bacia Hidrográfica Amazônica, a hidrovia se estende por aproximadamente 1.600 quilômetros, abrangendo trechos dos rios Tapajós e Amazonas (ANTAQ, 2021). Ao longo de sua extensão, a Hidrovia do Tapajós atravessa uma paisagem exuberante e diversificada, passando por vastas áreas de floresta tropical, comunidades ribeirinhas e centros urbanos importantes, como Itaituba e Aveiro. Essa rota fluvial é crucial para a conectividade econômica e social da região, facilitando o transporte de cargas e passageiros, além de garantir o acesso a serviços essenciais e oportunidades de desenvolvimento (ANTAQ, 2021).

Apesar dos desafios relacionados à navegabilidade sazonal, provocados pelas variações no nível d'água, a Hidrovia do Tapajós continua a ser uma via fundamental para o escoamento da produção agrícola, mineral e madeireira da Amazônia, contribuindo significativamente para a economia local e nacional. Ademais, essa hidrovia representa um potencial importante para o desenvolvimento sustentável da região, oferecendo oportunidades para investimentos em infraestrutura, logística e preservação ambiental.

A navegação fluvial é um dos principais modos de transporte na região amazônica, desempenhando um papel vital na economia local e nacional. A Hidrovia do Rio Tapajós, em particular, é de grande importância para o escoamento de produtos agrícolas e minerais, conectando cidades e permitindo o fluxo de mercadorias. No entanto, a navegabilidade dessa hidrovia é frequentemente afetada pela dinâmica dos bancos de areia, que mudam ao longo do tempo devido a processos naturais, como o regime hidrológico sazonal e a deposição de sedimentos (GUIMARÃES; SOUZA FILHO, 2005).

Esses bancos de areia representam um desafio significativo para a segurança e eficiência do tráfego fluvial, uma vez que podem alterar a profundidade do rio e criar áreas de difícil navegação. Assim, a identificação precisa e o monitoramento dessas formações são essenciais para garantir uma navegação segura, especialmente em trechos críticos da hidrovia (ASSINE, 2003).

Neste trabalho, utilizamos o método geoestatístico de Krigagem, uma técnica de interpolação do tipo BLUE (Best Linear Unbiased Estimator - Melhor Estimador

Linear Imparcial), para analisar a distribuição espacial dos bancos de areia ao longo do trecho da Hidrovia do Rio Tapajós, entre Itaituba e Aveiro. A Krigagem se destaca como uma ferramenta poderosa para estimar variáveis espaciais, como a profundidade do leito do rio, com base em dados pontuais obtidos em levantamentos de campo e nas cartas náuticas (ISAACKS; SRIVASTAVA, 1989; WEBSTER; OLIVER, 2007).

A relevância desta pesquisa reside na sua contribuição para a gestão eficiente da hidrovia, propondo soluções que visam minimizar os impactos dos bancos de areia na navegação. Ao empregar métodos precisos de interpolação, espera-se fornecer uma base sólida para a elaboração de estratégias de mitigação e manutenção das rotas navegáveis, favorecendo, assim, o desenvolvimento econômico da região (LATRUBESSE; STEVAUX; SINHA, 2005).

### **1.1 Motivação e justificativa**

O ambiente passa por mudanças constantes, tanto por processos naturais quanto por intervenções humanas. A dinâmica de erosão e deposição nos rios é influenciada pela velocidade da água, sua capacidade de transporte, volume e tamanho dos sedimentos fornecidos (RADEMANN et al., 2023). Gonçalves, Fernandes e Leão (2017) observam que os depósitos fluviais, chamados localmente de coroas, variam durante os períodos de cheia e estiagem.

Os sedimentos tendem a se concentrar em obstáculos, ao exemplo de curvas meândricas pronunciadas, levando à perda de energia de transporte dos sedimentos pelo rio (GONÇALVES; FERNANDES; LEÃO, 2017). Essas dinâmicas de erosão e deposição podem indicar desequilíbrios ambientais, tornando essencial a análise dessas mudanças para compreender os processos e auxiliar no planejamento territorial (RADEMANN et al., 2023).

Silva et al. (2021) destacam que processos hidrossedimentológicos naturais, combinados com atividades humanas, causam a migração anual dos bancos de areia e seu aumento em extensão. A compreensão da dinâmica desses bancos em rios envolve a medição e modelagem da tensão de cisalhamento, rugosidade, velocidade e volume da água, morfologia do canal de drenagem e granulometria da areia em diferentes pontos do rio (RADEMANN et al., 2023).

O monitoramento dos bancos de areia pode ser realizado por meio de imagens de satélite, oferecendo maior cobertura espacial e temporal. Rademann et al. (2023) indicam que dados derivados de sensoriamento remoto, especialmente de radar de abertura sintética, têm potencial para avaliar a dinâmica de bancos de areia. No contexto da pesquisa, a bacia hidrográfica amazônica, uma das maiores do mundo, abriga o rio Tapajós como um de seus principais afluentes (GOZZI, 2019).

O Rio Tapajós desempenha um papel extraordinário no transporte de grânéis sólidos e carga geral, destacando a importância estratégica da bacia hidrográfica do Tapajós. Projetos foram propostos para criar hidrovias visando escoar grãos do centro-norte do estado de Mato Grosso para o leste do Pará. No entanto, alguns trechos, como entre as cachoeiras de São Luís do Tapajós e do Chacorão, não são navegáveis (SALOMÃO; DA MOTA; MELO, 2021).

Salomão, Da Mota e Melo (2021) apontam que o trecho do baixo Teles Pires no Rio Tapajós possui bancos de areia, limitando o potencial do uso hidroviário e contribuindo para custos elevados de transporte. Portanto, é justificável a pesquisa sobre a dinâmica dos bancos de areia e seu possível impacto na navegabilidade, especialmente considerando a dependência do país no modal rodoviário.

Além da baixa vazão, estudos recentes indicam que o fluxo hídrico na foz do rio Tapajós, é em grande parte bloqueado por barras do rio Amazonas. Isso levou a considerar o baixo rio Tapajós não como um rio, mas como um lago. Até a década de 90, o Tapajós era reconhecido como um rio de águas claras devido à baixa carga sedimentar em suspensão. Entretanto, ao ser represado na confluência com o rio Amazonas, ele gradualmente se transforma em um rio afogado, ou lago, assim como outros corpos d'água que deságuam nele (GOZZI, 2019).

Em sua pesquisa, Rademann et al. (2023) identificaram, por meio da análise temporal dos bancos de areia na bacia do Rio Areal do Limeira, uma predominância de áreas de deposição inferiores a 0,1 ha, com uma média de 54,83 depósitos por ano durante o período estudado. Em geral, o ano de 2012 teve a maior área total de bancos de areia, atingindo 23,60 ha, enquanto o ano de 2015 registrou a menor área de ocorrência, com 13,28 ha.

## **1.2 Hipótese**

Hipótese 1: Variações sazonais no regime hidrológico do Rio Tapajós influenciam na evolução dos bancos de areia, com períodos de cheias favorecendo a mobilidade sedimentar e períodos de seca contribuindo para a erosão dessas formações.

Hipótese 2: Influência da dinâmica dos bancos de areia na navegabilidade da hidrovia do Tapajós é agravada durante eventos de seca extrema, resultando em restrições significativas nas rotas de navegação. A compreensão desses impactos é essencial para desenvolver estratégias que garantam a segurança e eficiência do transporte fluvial nesse trecho.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

No Capítulo 1, apresenta-se a introdução geral ao estudo, ressaltando a relevância da pesquisa sobre a dinâmica dos bancos de areia no trecho entre Itaituba e Aveiro. Este capítulo discute a motivação e a justificativa para a investigação, além de expor a hipótese a ser analisada. Também é feita uma descrição da estrutura da dissertação de mestrado, delineando os principais tópicos abordados em cada capítulo. Além de serem apresentados os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

O Capítulo 2, Referencial Teórico, aborda os principais conceitos relacionados aos bancos de areia. Neste capítulo, discute-se a formação e a evolução dessas formações, sua importância para a geomorfologia fluvial e sua influência na hidrodinâmica dos rios. Além disso, revisitam-se estudos anteriores sobre a dinâmica dos bancos de areia, oferecendo uma base teórica sólida para a pesquisa.

No Capítulo 3, Aspecto Geral do Problema, fornece-se um panorama abrangente do problema em estudo. Aqui, são discutidas informações sobre a região entre Itaituba e Aveiro, incluindo o relevo, as características hidrológicas e os impactos

dos bancos de areia. Exploramos também aspectos relacionados à importância socioeconômica da região e os desafios enfrentados devido à presença desses bancos.

O Capítulo 4, apresenta a caracterização da área de estudo.

No Capítulo 5, descrevem-se as metodologias utilizadas na pesquisa, abordando a delimitação da área de estudo e os pontos específicos onde foram realizadas as coletas de dados. São apresentados os instrumentos utilizados e os métodos empregados para analisar e interpretar os dados coletados, além de detalhar as etapas de processamento e interpretação dos dados.

No Capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos na pesquisa. Discutem-se as informações coletadas e analisadas, incluindo dados hidrológicos, geológicos e geomorfológicos. Mapas, gráficos e tabelas ilustram a distribuição e as características dos bancos de areia no trecho entre Itaituba e Aveiro, com uma análise em relação à hipótese inicialmente proposta.

No Capítulo 7, são apresentadas as discussões geradas a partir dos resultados obtidos.

O Capítulo 8, traz a Conclusão, resumindo os principais achados da pesquisa e suas implicações.

No Capítulo 9, são oferecidas sugestões para pesquisas futuras, com o intuito de direcionar investigações que possam complementar ou expandir os achados deste estudo.

Por fim, no Capítulo 10 apresenta uma lista completa das referências bibliográficas utilizadas na dissertação, incluindo livros, artigos científicos, relatórios técnicos e outras fontes relevantes que fundamentam a pesquisa e as discussões abordadas nos capítulos anteriores.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivos geral

Investigar a influência do regime hidrológico sazonal, da geometria do leito do rio na formação e evolução dos bancos de areia no Rio Tapajós, no trecho entre Itaituba e Aveiro, com foco nas implicações da navegabilidade e segurança da navegação fluvial.

Investigar a dinâmica dos bancos de areia no trecho entre Itaituba e Santarém, a fim de compreender os processos envolvidos na formação, estabilidade e evolução dessas estruturas fluviais.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- i. Analisar a distribuição espacial e identificar padrões de formação e erosão dos bancos de areia.
- ii. Investigar a influência do regime hidrológico na dinâmica dos bancos de areia, considerando variações sazonais e eventos extremos;
- iii. Examinar a influência do regime hidrológico, incluindo variações sazonais e eventos de seca extrema, na navegabilidade.
- iv. Avaliar como as características físicas e as variações dos bancos de areia influenciam as práticas e a segurança da navegação fluvial.
- v. Estimar os impactos dos bancos de areia na navegabilidade, avaliando-as como afetam as rotas de navegação e a segurança da navegação fluvial.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

No referencial teórico, são apresentados os conceitos básicos sobre bancos de areia fluviais, importância dos bancos de areia para a geomorfologia fluvial, influência dos bancos de areia na hidrodinâmica do rio e estudos anteriores sobre a dinâmica dos bancos de areia, utilizando as referências bibliográficas selecionadas para embasar esta dissertação de mestrado.

### **2.1 Conceitos básicos sobre bancos de areia fluviais**

Os bancos de areia fluviais são formações sedimentares que ocorrem nos leitos dos rios, compostos principalmente por sedimentos arenosos. Segundo Costa e Almeida (2018), essas estruturas são caracterizadas pela sua dinamicidade, sendo influenciadas por diversos fatores, como o regime hidrológico, a velocidade da correnteza, a disponibilidade de sedimentos e as características do leito do rio.

Dias e Souza (2020) ressaltam a importância dos bancos de areia na geomorfologia fluvial, destacando que eles desempenham um papel fundamental na dinâmica dos rios. Além de influenciarem a hidrodinâmica do rio, os bancos de areia também são relevantes para o transporte e armazenamento de sedimentos, bem como para a formação de habitats e o funcionamento dos ecossistemas fluviais.

Freitas et al. (2017) abordam a interação entre os bancos de areia e os canais sinuosos dos rios. Segundo os autores, os bancos de areia podem atuar como unidades geomorfológicas ativas, afetando a dinâmica do canal e contribuindo para a formação de meandros e a evolução da morfologia fluvial.

A compreensão dos processos de formação, estabilidade e evolução dos bancos de areia é essencial para o entendimento da dinâmica fluvial. Lima et al. (2015) destacam que a dinâmica dos bancos de areia está relacionada a fatores como a disponibilidade de sedimentos, a interação entre o fluxo da correnteza e o leito do rio, e a variação do regime hidrológico ao longo do tempo.

Lima et al. (2015) ressaltam a importância de estudos anteriores sobre a dinâmica dos bancos de areia. Segundo os autores, essas pesquisas têm contribuído para o avanço do conhecimento sobre os processos que influenciam a formação e a estabilidade dessas estruturas, permitindo uma melhor compreensão da geomorfologia fluvial e subsidiando ações de gestão e conservação dos recursos hídricos.

Melo e Santos (2019) discutem a influência das variações sazonais no regime hidrológico sobre a dinâmica dos bancos de areia. Segundo os autores, as mudanças nas vazões dos rios ao longo das estações podem afetar significativamente a formação, deslocamento e evolução dos bancos de areia, uma vez que influenciam a velocidade da correnteza e a disponibilidade de sedimentos transportados.

Mota, Silva e Martinelli (2019) destacam a importância da interação entre os bancos de areia e a vegetação ribeirinha. Essa interação pode influenciar a sedimentação e a estabilidade dos bancos de areia, bem como fornece habitat e proteção para a fauna aquática. Além disso, a presença de vegetação pode afetar a dinâmica do rio, alterando o fluxo da correnteza e contribuindo para a formação de novos bancos de areia.

Novaes, Santos e Reis (2017) abordam os processos de erosão e deposição nos bancos de areia fluviais. Segundo os autores, a erosão das margens do rio pode fornecer sedimentos para a formação e crescimento dos bancos de areia, enquanto a deposição de sedimentos pode ocorrer nos períodos de menor velocidade da correnteza. Compreender esses processos é essencial para avaliar a estabilidade dos bancos de areia e sua evolução ao longo do tempo.

Oliveira et al. (2017) discutem a influência das atividades antrópicas sobre os bancos de areia. Essas atividades podem incluir a construção de barragens, o desmatamento e o assoreamento de rios, entre outros. Os autores ressaltam que as intervenções humanas podem alterar a dinâmica fluvial, afetando a formação e a estabilidade dos bancos de areia, bem como os processos de transporte e sedimentação.

Silva, Dantas e Santos (2022) exploram a influência da topografia do leito do rio na formação e distribuição dos bancos de areia. Os autores destacam que a geomorfologia do leito, incluindo a presença de estruturas como barras e reentrâncias, pode influenciar a dinâmica fluvial e contribuir para a ocorrência de bancos de areia em determinadas áreas do trecho entre Itaituba e Aveiro.

Os conceitos básicos sobre bancos de areia fluviais envolvem sua natureza dinâmica, sua influência na hidrodinâmica dos rios, sua importância na geomorfologia fluvial e sua interação com os canais sinuosos. Com base no grupo de referências selecionado, pode-se embasar o estudo aprofundando esses conceitos e investigando a dinâmica dos bancos de areia no trecho entre Itaituba e Aveiro.

A compreensão dos bancos de areia fluviais vai além dos conceitos básicos e envolve aspectos como variações sazonais no regime hidrológico, interação com a vegetação ribeirinha, processos de erosão e deposição, influência das atividades antrópicas e a topografia do leito do rio. Considerando o grupo de referências selecionado, esses conteúdos ampliam nosso entendimento sobre a dinâmica dos bancos de areia no trecho entre Itaituba e Aveiro, contribuindo para uma análise mais abrangente desse fenômeno.

## **2.2 Importâncias dos bancos de areia para a geomorfologia fluvial**

De acordo com Costa e Almeida (2018), os bancos de areia desempenham um papel fundamental na dinâmica dos rios, influenciando diversos processos geomorfológicos. Essas formações sedimentares atuam como unidades de armazenamento e transporte de sedimentos, contribuindo para a redistribuição dos materiais ao longo do leito fluvial.

Dias e Souza (2020) ressaltam que os bancos de areia têm influência direta na hidrodinâmica dos rios. Eles afetam o fluxo da correnteza, criando zonas de maior turbulência e áreas de menor velocidade. Essas variações na hidrodinâmica são responsáveis por modificações na geomorfologia fluvial, como a formação de barras arenosas e meandros.

A presença dos bancos de areia também desempenha um papel importante na criação de habitats para a fauna aquática. Freitas et al. (2017) destacam que essas estruturas fluviais fornecem abrigo, alimentação e áreas de reprodução para várias espécies. Dessa forma, os bancos de areia contribuem para a diversidade biológica dos ecossistemas fluviais.

Além disso, a interação entre os bancos de areia e os canais sinuosos dos rios é relevante para a geomorfologia fluvial. Lima et al. (2015) mencionam que essas formações podem influenciar a dinâmica do canal, afetando a sinuosidade e o desenvolvimento de meandros. Os bancos de areia podem atuar como obstáculos à correnteza, redirecionando o fluxo e induzindo mudanças na morfologia do rio ao longo do tempo.

Lima et al. (2015) apontam que a compreensão dos processos relacionados aos bancos de areia é essencial para a gestão e conservação dos recursos hídricos. Através do estudo dessas formações, é possível obter informações valiosas sobre o transporte de sedimentos, a estabilidade do leito fluvial e os impactos das atividades humanas nos rios.

Melo e Santos (2019) abordam a importância dos bancos de areia como indicadores de mudanças ambientais. Essas formações sedimentares podem registrar informações sobre variações no fluxo da correnteza, sedimentação e processos erosivos ao longo do tempo. Portanto, a análise dos bancos de areia pode fornecer *insights* sobre a evolução dos rios e as influências ambientais que os afetam.

Mota, Silva e Martinelli (2019) discutem a interação dos bancos de areia com a dinâmica do transporte de sedimentos nos rios. Eles destacam que essas estruturas atuam como áreas de deposição, capturando sedimentos em suspensão e promovendo a sedimentação em suas superfícies. Essa interação afeta a distribuição e a disponibilidade de sedimentos ao longo do leito fluvial.

A estabilidade dos bancos de areia também é um aspecto relevante a ser considerado. Novaes, Santos e Reis (2017) mencionam que fatores como a taxa de sedimentação, a cobertura vegetal e a hidrodinâmica do rio podem influenciar a estabilidade dessas estruturas. A compreensão dos mecanismos que levam à estabilidade ou instabilidade dos bancos de areia é essencial para a gestão e o planejamento adequados das áreas ribeirinhas.

Outro aspecto importante é a influência dos bancos de areia na qualidade da água dos rios. Oliveira et al. (2017) destacam que essas formações podem atuar como filtros naturais, removendo partículas suspensas e substâncias químicas presentes na água. Dessa forma, os bancos de areia podem desempenhar um papel na purificação e na melhoria da qualidade dos recursos hídricos.

Por fim, Silva, Dantas e Santos (2022) abordam a importância dos bancos de areia como áreas de recreação e lazer. Essas formações atraem a atenção de turistas e visitantes, proporcionando oportunidades para atividades como banho, pesca e contemplação da natureza. A valorização dos bancos de areia como atrativo turístico pode contribuir para o desenvolvimento econômico das regiões ribeirinhas.

Os bancos de areia também podem ser explorados como indicadores de mudanças ambientais, influenciadores do transporte de sedimentos, elementos relacionados à estabilidade e qualidade da água dos rios, bem como áreas de recreação e lazer. Considerando o grupo de referências selecionado, esses conteúdos adicionam uma perspectiva mais ampla ao estudo da dinâmica dos bancos de areia no trecho entre Itaituba e Aveiro, enriquecendo a compreensão dessas formações e suas múltiplas interações no ambiente fluvial.

Portanto, os bancos de areia desempenham um papel significativo na geomorfologia fluvial, influenciando a hidrodinâmica dos rios, fornecendo habitat para a fauna aquática e contribuindo para a formação e evolução da geomorfologia fluvial. A compreensão da importância dessas estruturas é essencial para a gestão e conservação adequada dos recursos hídricos.

### **2.3 Influências dos bancos de areia na hidrodinâmica do rio**

De acordo com Costa e Almeida (2018), os bancos de areia têm um impacto significativo na hidrodinâmica fluvial. Essas formações sedimentares afetam o fluxo da correnteza e podem criar zonas de maior turbulência e áreas de menor velocidade. A presença dos bancos de areia induz variações na hidrodinâmica, alterando o comportamento do fluxo e influenciando a morfologia do rio.

Dias e Souza (2020) destacam que os bancos de areia podem causar modificações no padrão de fluxo do rio. A presença dessas estruturas pode redirecionar o fluxo da água, criando desvios na correnteza e influenciando a formação de meandros. Essas mudanças na hidrodinâmica são fundamentais para a compreensão da dinâmica fluvial e suas consequências na morfologia do rio.

A interação dos bancos de areia com a hidrodinâmica também está relacionada à redistribuição de sedimentos. Freitas et al. (2017) mencionam que essas formações atuam como unidades de armazenamento e transporte de sedimentos. Durante eventos de enchentes ou vazões mais altas, os bancos de areia podem capturar sedimentos em suspensão, promovendo a sedimentação e contribuindo para a redistribuição dos materiais ao longo do leito fluvial.

A presença dos bancos de areia pode afetar a dissipação de energia na correnteza. Lima et al. (2015) ressaltam que essas formações sedimentares podem atuar como obstáculos à passagem da água, resultando em uma maior dissipação de energia. Isso pode levar à redução da velocidade da correnteza em determinadas áreas, o que tem implicações na sedimentação e na dinâmica fluvial em geral.

Lima et al. (2015) abordam a influência dos bancos de areia na distribuição espacial da velocidade da correnteza. Estes autores mencionam que a presença dessas estruturas pode criar gradientes de velocidade ao longo do rio, com áreas de maior velocidade nas proximidades dos bancos de areia e áreas de menor velocidade nas áreas adjacentes. Essas variações na velocidade da correnteza são importantes para a compreensão da hidrodinâmica fluvial e suas implicações na geomorfologia e sedimentação.

A interação dos bancos de areia com a hidrodinâmica pode desencadear processos de erosão e sedimentação. Segundo Melo e Santos (2019), a presença dessas formações sedimentares pode alterar o padrão de transporte de sedimentos, resultando em áreas de maior deposição em suas proximidades e áreas de erosão nas áreas adjacentes. A erosão e sedimentação associadas aos bancos de areia têm implicações significativas na morfologia fluvial e na dinâmica dos rios.

A geometria dos bancos de areia também desempenha um papel fundamental na hidrodinâmica. Mota, Silva e Martinelli (2019) mencionam que a forma e a altura dessas estruturas podem influenciar o comportamento do fluxo de água ao redor delas. Bancos de areia mais altos e com formas mais pronunciadas podem causar uma maior perturbação na correnteza, afetando a hidrodinâmica local e a distribuição de sedimentos.

A heterogeneidade espacial dos bancos de areia também contribui para a complexidade da hidrodinâmica fluvial. Silva et al. (2021) destacam que a presença de diferentes tamanhos e distribuição dos bancos de areia ao longo do trecho estudado pode resultar em variações na velocidade da correnteza e na hidrodinâmica local. Essas variações podem influenciar os processos de transporte de sedimentos, a sedimentação e a morfologia fluvial em diferentes seções do rio.

Além disso, a influência dos bancos de areia na hidrodinâmica pode ter implicações para o transporte de matéria orgânica e nutrientes nos rios. Segundo Silva et al. (2022), essas formações podem atuar como áreas de retenção de matéria orgânica e nutrientes, promovendo sua acumulação e ciclagem dentro do sistema fluvial. A hidrodinâmica associada aos bancos de areia desempenha um papel importante na regulação desses processos biogeoquímicos.

Por fim, a influência dos bancos de areia na hidrodinâmica também pode estar relacionada a eventos extremos, como cheias e secas. Segundo Novaes, Santos e Reis (2017), a presença dessas formações pode afetar a dinâmica do fluxo durante esses eventos, influenciando a velocidade da correnteza, o transporte de sedimentos e a resposta do rio às variações no nível da água.

A influência dos bancos de areia na hidrodinâmica dos rios abrange aspectos como erosão, sedimentação, geometria das estruturas, heterogeneidade espacial, transporte de matéria orgânica e nutrientes, além da resposta a eventos extremos. Considerando o grupo de referências selecionado, esses novos conteúdos fornecem uma visão mais abrangente da influência dos bancos de areia na hidrodinâmica fluvial no trecho entre Itaituba e Aveiro, contribuindo para a compreensão dos processos e interações envolvidos nesse ambiente.

Os bancos de areia exercem uma influência significativa na hidrodinâmica dos rios. Eles afetam o fluxo da correnteza, induzem mudanças no padrão de fluxo, contribuem para a redistribuição de sedimentos e influenciam a dissipação de energia e a distribuição espacial da velocidade da correnteza. Compreender a influência dos bancos de areia na hidrodinâmica é fundamental para uma análise mais completa da dinâmica fluvial e seus processos associados no trecho entre Itaituba e Aveiro.

## **2.4 Estudos sobre a dinâmica dos bancos de areia**

Diversos autores têm se dedicado ao estudo da dinâmica dos bancos de areia em rios. Santos et al. (2018) investigaram a formação e o desenvolvimento dos bancos de areia em um trecho fluvial, destacando a importância da sedimentação e da hidrodinâmica na sua gênese. Os resultados obtidos contribuíram para a compreensão dos processos envolvidos na formação dessas estruturas e sua evolução ao longo do tempo.

Além disso, estudos têm se concentrado na caracterização geomorfológica dos bancos de areia. Pereira e Souza (2019) realizaram um levantamento detalhado dos bancos de areia em um trecho fluvial, identificando suas principais características, como tamanho, forma e distribuição espacial. Essa caracterização geomorfológica forneceu informações essenciais para compreender a dinâmica dessas estruturas e sua interação com o ambiente fluvial.

Outros estudos também têm explorado a dinâmica temporal dos bancos de areia. Machado et al. (2020) investigaram a variação espacial e temporal dos bancos de areia em um rio, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e modelagem numérica. Os resultados obtidos permitiram identificar as mudanças na posição e na morfologia dos bancos de areia ao longo de diferentes períodos, fornecendo *insights* valiosos sobre sua dinâmica evolutiva.

Além disso, é importante destacar estudos que se concentraram na interação dos bancos de areia com a vegetação ripária. Silva et al. (2019) examinaram a influência da presença de vegetação na estabilidade dos bancos de areia e sua relação com a dinâmica fluvial. Os resultados sugerem que a vegetação ripária desempenha um papel fundamental na estabilização dos bancos de areia, contribuindo para sua manutenção e evolução.

Outros estudos têm explorado a dinâmica dos bancos de areia em relação aos processos hidrodinâmicos e à sedimentação. Lima et al. (2021) investigaram a influência da vazão e da hidrodinâmica fluvial na distribuição e na geomorfologia dos bancos de areia. Os resultados indicaram que a velocidade da correnteza e as variações na vazão desempenham um papel crucial na formação e na evolução dessas estruturas.

No que diz respeito à formação dos bancos de areia, estudos têm explorado a influência de fatores como a dinâmica fluvial e a disponibilidade de sedimentos. Ferreira et al. (2020) investigaram a relação entre a variação da carga de sedimentos suspensos e a formação de bancos de areia em um rio. Os resultados indicaram que períodos de maior transporte de sedimentos estão associados à formação e ao crescimento dessas estruturas, evidenciando a importância da disponibilidade de sedimentos no processo de formação dos bancos de areia.

Outra abordagem importante nos estudos sobre a dinâmica dos bancos de areia é sua influência na ecologia fluvial. Santos et al. (2021) examinaram a diversidade biológica e os processos ecológicos associados aos bancos de areia em um rio. Os resultados destacaram a importância dessas formações como habitats para espécies aquáticas e como áreas de reprodução e alimentação. Além disso, os bancos de areia foram identificados como componentes-chave para a conectividade hidrológica e o fluxo de nutrientes no ecossistema fluvial.

No contexto dos processos antropogênicos, alguns estudos têm investigado os impactos das atividades humanas na dinâmica dos bancos de areia. Oliveira et al. (2018) analisaram o efeito de barragens no comportamento dos bancos de areia em um rio. Os resultados mostraram que a construção de barragens pode alterar a hidrodinâmica e a disponibilidade de sedimentos, afetando a formação e a evolução dos bancos de areia. Esses achados ressaltam a importância de considerar os efeitos das intervenções antrópicas na dinâmica dos rios e seus bancos de areia.

Outro aspecto relevante é a relação entre os bancos de areia e a qualidade da água. Barbosa et al. (2022) investigaram a capacidade dos bancos de areia em reter poluentes e nutrientes, contribuindo para a melhoria da qualidade da água em um trecho fluvial. Os resultados destacaram o papel dessas formações como importantes agentes de filtragem e retenção, fornecendo benefícios para a conservação dos recursos hídricos e a manutenção dos ecossistemas aquáticos.

Quanto à interação dos bancos de areia com os processos sedimentares, Oliveira et al. (2017) investigaram a influência da hidrodinâmica fluvial na distribuição espacial dos sedimentos e sua relação com a formação e a evolução dos bancos de areia. Os resultados destacaram a importância da velocidade da correnteza e da concentração de sedimentos na sedimentação e na erosão dos bancos de areia, evidenciando a complexidade das interações entre os processos sedimentares e a dinâmica dessas estruturas.

Outra linha de pesquisa relevante refere-se à estabilidade dos canais fluviais em relação aos bancos de areia. Souza et al. (2019) examinaram a relação entre a presença de bancos de areia e a estabilidade dos canais fluviais, considerando fatores como a vegetação ripária e a morfologia do canal. Os resultados mostraram que os bancos de areia desempenham um papel significativo na estabilização dos canais, atuando como barreiras naturais contra a erosão das margens e contribuindo para a manutenção da dinâmica fluvial.

Além disso, estudos têm explorado as possíveis influências das mudanças climáticas na dinâmica dos bancos de areia. Silva et al. (2020) investigaram os efeitos das variações nos regimes de chuvas e na vazão fluvial sobre a formação e a evolução dos bancos de areia em um rio. Os resultados apontaram que as mudanças climáticas podem desencadear alterações significativas na hidrodinâmica fluvial, afetando a sedimentação e a estabilidade dos bancos de areia.

Outro aspecto relevante é a relação entre os bancos de areia e a conectividade fluvial. Santos et al. (2022) examinaram a influência dos bancos de areia na conectividade longitudinal e lateral dos rios, considerando seu papel na dispersão de sedimentos e na conectividade hidrológica. Os resultados indicaram que os bancos de areia desempenham um papel importante na formação de corredores de fluxo e na manutenção da diversidade de habitats ao longo dos rios.

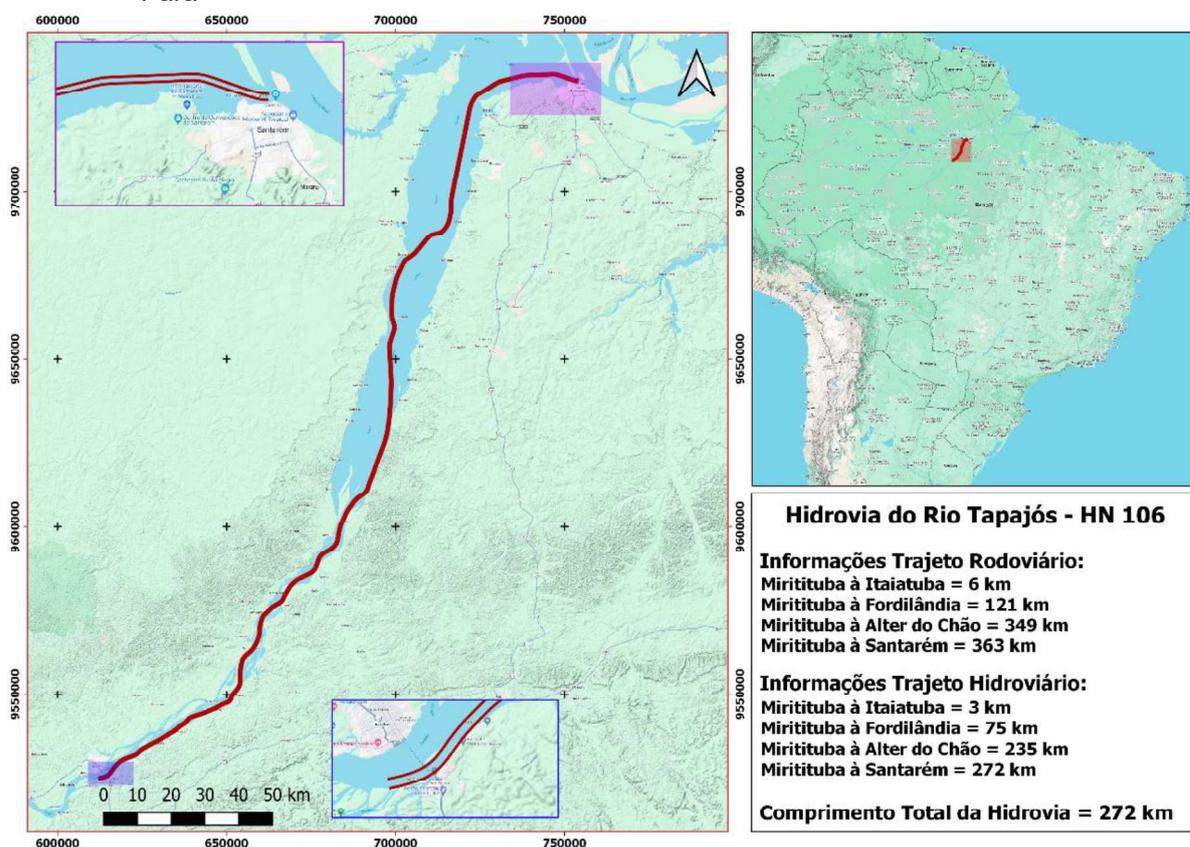
Estudos anteriores sobre a dinâmica dos bancos de areia têm abordado novos conteúdos relacionados à interação com os processos sedimentares, a estabilidade dos canais fluviais, as mudanças climáticas e a conectividade fluvial. Essas pesquisas fornecem *insights* importantes para compreender as complexas interações entre os bancos de areia e o ambiente fluvial, destacando a necessidade de considerar múltiplos fatores na análise da dinâmica dessas estruturas no trecho entre Itaituba e Aveiro.

Os estudos anteriores sobre a dinâmica dos bancos de areia fornecem uma base consistente para a compreensão desse fenômeno. Essas pesquisas abordaram aspectos como formação, evolução, caracterização geomorfológica, dinâmica temporal, interação com a vegetação ripária, processos hidrodinâmicos e sedimentação. Ao utilizar o grupo de referências selecionado, é possível embasar o presente estudo em um corpo de conhecimento consolidado, contribuindo para uma análise abrangente e aprofundada da dinâmica dos bancos de areia no trecho entre Itaituba e Aveiro.

### 3. ASPECTOS GERAL DO PROBLEMA

Neste capítulo, é abordado o panorama geral do problema relacionado à dinâmica dos bancos de areia na Hidrovia do Tapajós, em especial o trecho entre Itaituba e Aveiro. São discutidas informações sobre a região, características hidrológicas e os impactos dos bancos de areia. O trecho entre Itaituba e Aveiro (Pará), é atravessado pelo Rio Tapajós (Figura 1). Essa região é caracterizada por apresentar um relevo diversificado, com áreas planas e áreas mais sinuosas ao longo do curso do rio. Essa variação topográfica pode influenciar na formação e distribuição dos bancos de areia.

**Figura 1** – Mapa da Hidrovia do Rio Tapajós entre os municípios de Itaituba a Santarém estado do Pará

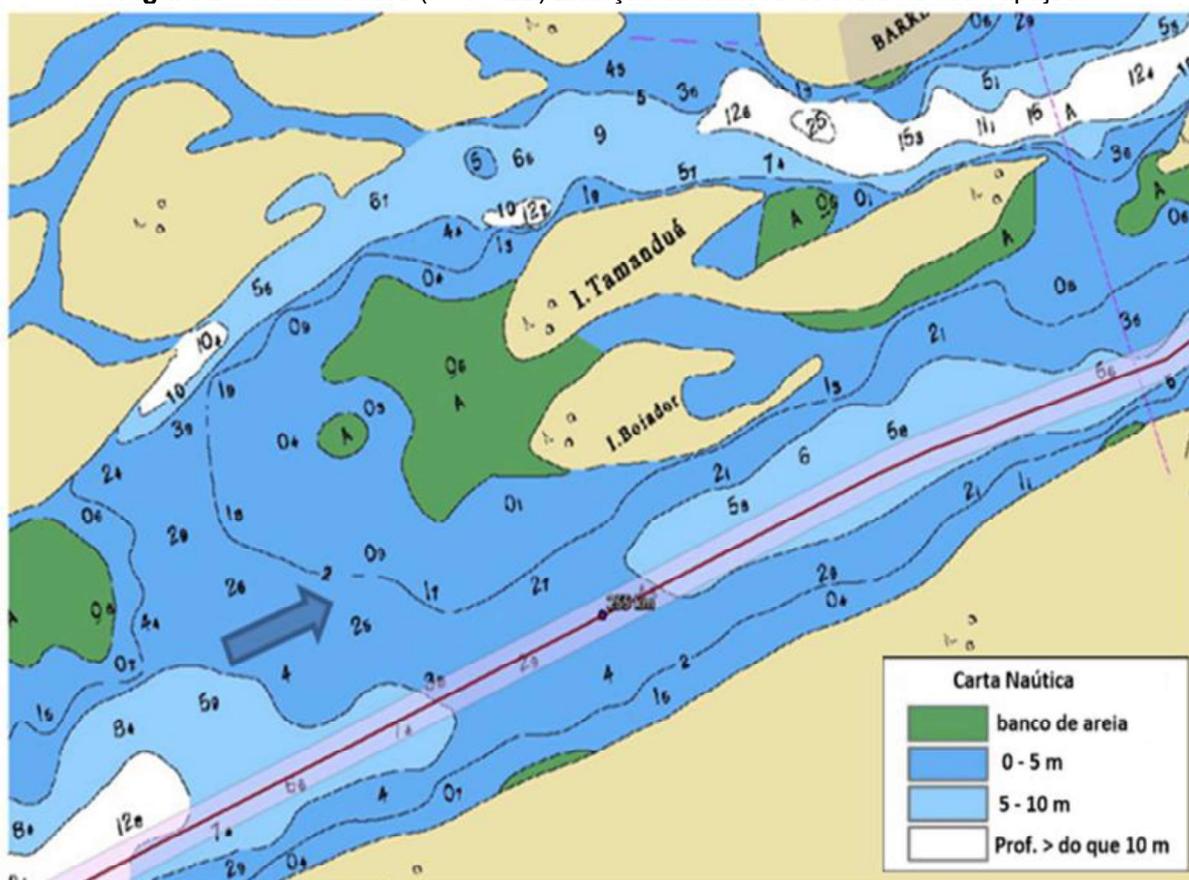


Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

O Rio Tapajós é um importante curso d'água da região amazônica, com uma bacia hidrográfica extensa. Apresenta um regime hidrológico sazonal, com períodos de cheias e vazantes, influenciados pelas chuvas e pelas variações no nível do lençol freático. Essas variações sazonais no fluxo de água e no transporte de sedimentos podem afetar a formação e evolução dos bancos de areia.

Os bancos de areia são formações sedimentares que se desenvolvem no leito dos rios devido à deposição de sedimentos transportados pela correnteza (Figura 2). Eles podem variar em tamanho, forma e posição ao longo do trecho entre Itaituba e Aveiro. Essas formações podem ser temporárias, desaparecendo e reaparecendo em diferentes momentos, ou podem se estabelecer de forma mais permanente.

**Figura 2** – Carta náutica (nº 4382B) Exibição de bancos de areia no Rio Tapajós.



Fonte: Marinha do Brasil (1982)

A presença dos bancos de areia pode trazer impactos significativos para a região. A principal implicação está relacionada à navegação fluvial, uma vez que os bancos de areia podem dificultar a passagem de embarcações, aumentando os riscos de encalhes e acidentes. Isso afeta diretamente o transporte de cargas, o acesso a comunidades ribeirinhas e a atividade turística na região.

Além dos impactos na navegação, os bancos de areia também podem afetar a hidrodinâmica do rio. Eles alteram o fluxo de água, direcionando-o para diferentes canais e criando áreas de menor profundidade. Isso pode levar a mudanças na distribuição de sedimentos, na erosão das margens e na formação de novos bancos de areia (Figura 3).

**Figura 3 – Mapa batimétrico /2023 – Trecho próximo a Barreiras**

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

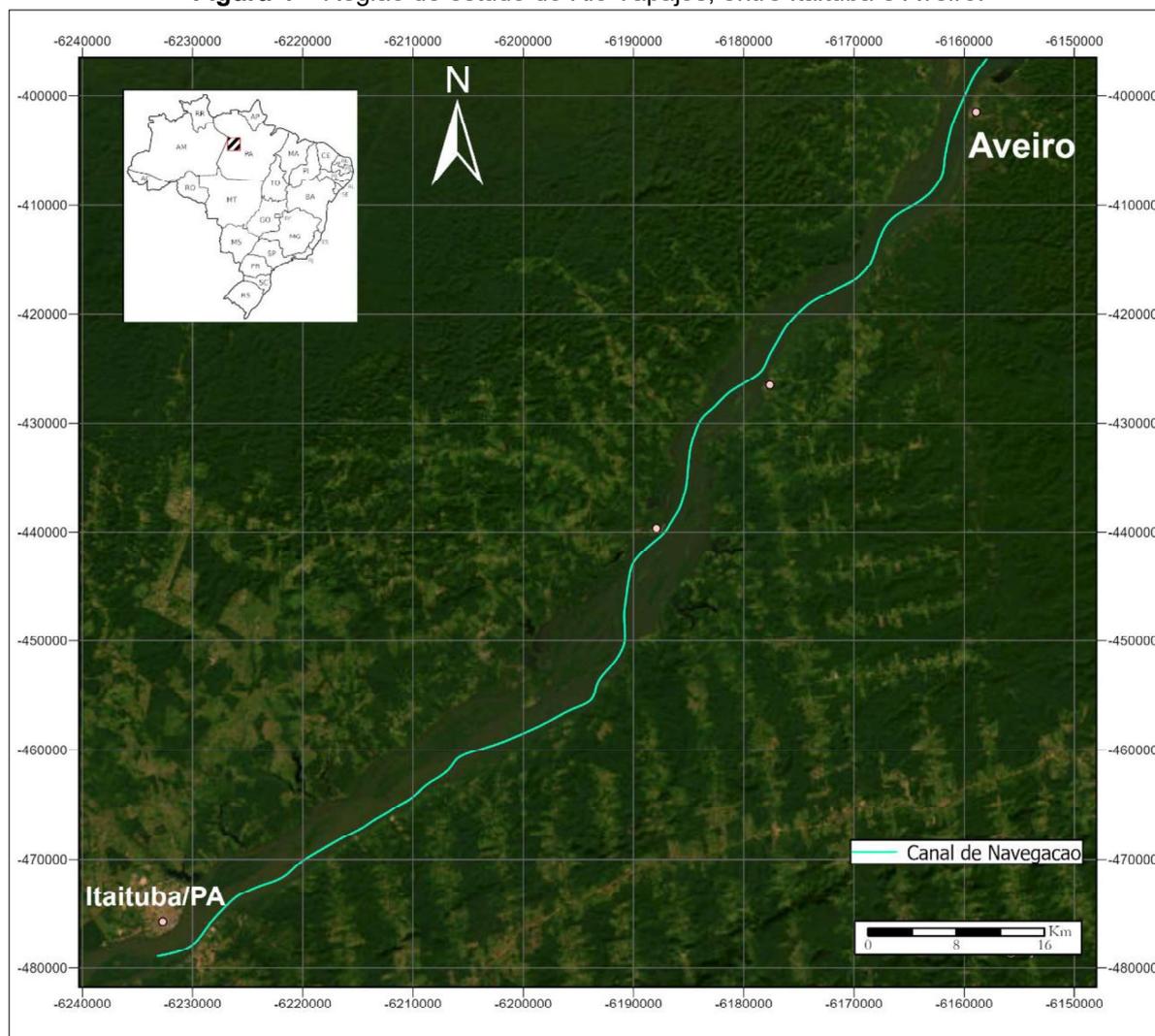
Diante desses aspectos, é fundamental compreender a dinâmica dos bancos de areia no trecho entre Itaituba e Aveiro. Isso permitirá o desenvolvimento de estratégias adequadas, visando minimizar os impactos negativos destes bancos e promover a segurança e sustentabilidade das atividades socioeconômicas na região.

#### 4. CARACTERIZAÇÕES DA ÁREA DE ESTUDO

A delimitação da área de estudo no trecho entre Itaituba e Aveiro é de extrema importância para compreender a dinâmica dos bancos de areia fluviais nessa região, localizado no Pará, esse trecho abrange uma parte significativa do rio Tapajós, um dos principais afluentes do rio Amazonas (Figura 4).

A região entre Itaituba e Aveiro possui características geográficas e ambientais únicas. Trata-se de uma área de transição entre a Floresta Amazônica e o Cerrado, apresentando uma grande diversidade de ecossistemas e biomas. A região é marcada por uma paisagem exuberante, com extensas áreas de floresta tropical, rios sinuosos e amplas planícies aluviais (COSTA; ALMEIDA, 2018; DIAS; SOUZA, 2020).

**Figura 4 – Região de estudo do Rio Tapajós, entre Itaituba e Aveiro.**



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

O trecho entre Itaituba e Aveiro é conhecido pela presença de numerosos bancos de areia fluviais, resultantes da acumulação de sedimentos no leito do rio. Esses bancos desempenham um papel fundamental na dinâmica fluvial da região, influenciando a hidrodinâmica do rio, a erosão e a sedimentação. Além disso, a área possui uma rica biodiversidade, abrigando diversas espécies de fauna e flora. O rio Tapajós é notável por sua importância na reprodução de peixes migratórios e por abrigar espécies endêmicas. A preservação desse ecossistema é essencial para a manutenção da vida aquática e para a sustentabilidade das comunidades locais que dependem dos recursos naturais.

A localização estratégica dos portos de Miritituba e Santarém tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento econômico da região amazônica. O Porto de Miritituba (Figura 5, 6) em particular, destaca-se como um importante ponto de escoamento da produção agrícola e mineral do interior do país. Sua proximidade com as áreas de produção, aliada à infraestrutura rodoviária em constante expansão, tem permitido um transporte rápido e eficiente de commodities até os mercados internacionais.

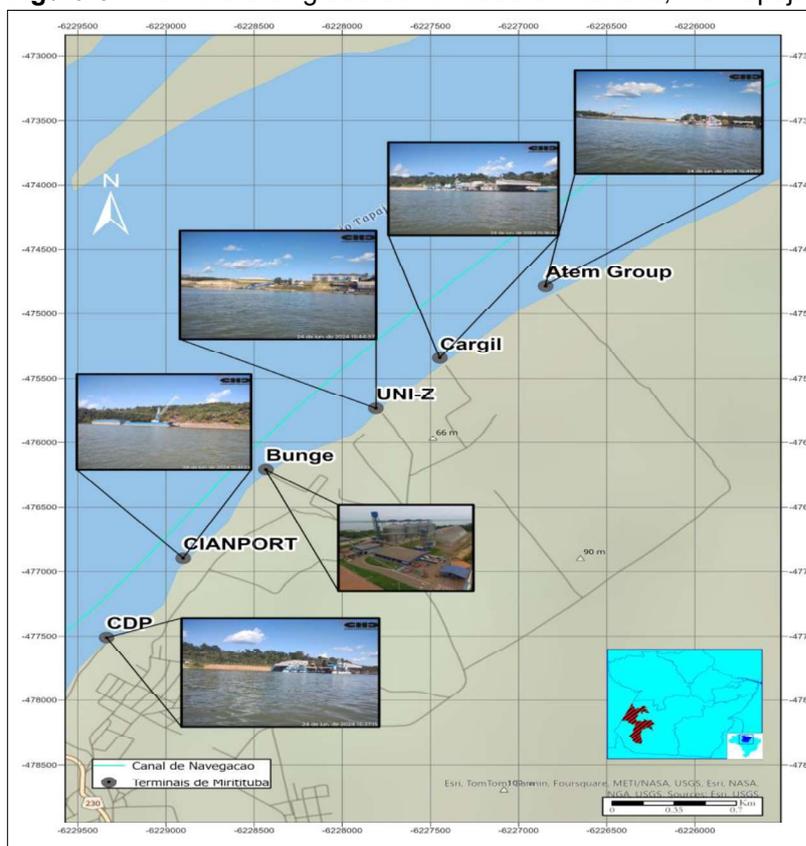
Por outro lado, o Porto de Santarém, com sua posição estratégica na confluência de dois grandes rios, consolidou-se como um hub logístico extraordinário para a região. Além de servir como ponto de transbordo para cargas que seguem pelo Rio Amazonas em direção aos portos do oceano Atlântico, Santarém também desempenha um papel importante no abastecimento das regiões vizinhas, garantindo o fluxo de mercadorias essenciais para as comunidades ribeirinhas e urbanas ao longo dos rios Tapajós e Amazonas.

**Figura 5** – Terminais de grão de Miritituba em Itaituba, Rio Tapajós. Vista aérea do Google Earth de 2023, do município de Itaituba, dos terminais e das barcaças



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

**Figura 6** – Terminais de grãos de Miritituba em Itaituba, Rio Tapajós



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

A interligação da hidrovia com a BR-163 pode ampliar as atividades relacionadas ao agronegócio na região. Isso viabilizaria o transporte da produção de grãos do norte e centro-leste de Mato Grosso e sudoeste do Pará aos portos da calha do rio Amazonas, permitindo embarques diretos em navios graneleiros para o exterior, sem a necessidade de transporte até o sudeste do Brasil.

Além de aumentar a capacidade de carga, a hidrovia oferece rotas alternativas para o escoamento da produção do centro-sul do país, contribuindo para descongestionar os modais de transporte e a infraestrutura portuária existente. Os rios Tapajós e Teles Pires formam um sistema hidroviário com grande potencial para o comércio e abastecimento das regiões norte e nordeste de Mato Grosso e sul do Pará.

No entanto, apesar dos benefícios econômicos proporcionados pelos portos de Miritituba e Santarém, é importante considerar os impactos ambientais e sociais associados a essa intensificação do transporte de cargas na Amazônia. O aumento do tráfego rodoviário, por exemplo, pode acarretar desmatamento, fragmentação de habitats naturais e pressões sobre comunidades indígenas e tradicionais. Portanto, medidas de mitigação e controle ambiental são essenciais para garantir que o desenvolvimento econômico da região seja sustentável e responsável.

Em suma, os portos de Miritituba e Santarém desempenham papéis cruciais na dinâmica econômica e logística da Amazônia, conectando o interior do Brasil aos mercados nacionais e internacionais. No entanto, é fundamental equilibrar os benefícios econômicos com a preservação ambiental e o respeito aos direitos das comunidades locais, a fim de garantir um desenvolvimento sustentável e inclusivo na região.

A delimitação do trecho entre Itaituba e Aveiro como área de estudo oferece uma oportunidade singular para investigar a complexidade e interações entre bancos de areia, a hidrodinâmica fluvial, a biodiversidade e a comunidade local. Compreender a dinâmica dos bancos de areia é essencial para a gestão e conservação dos recursos hídricos, promovendo o desenvolvimento sustentável da região amazônica.

Além disso, a proximidade com os centros urbanos de Aveiro e Itaituba destaca a relevância socioeconômica da área, intensificando a necessidade de estudos que conciliem o desenvolvimento regional com a preservação ambiental. Neste contexto, a delimitação da área de estudo não se restringe apenas na identificação das localizações dos bancos de areia.

Pois abrange uma abordagem multidisciplinar que considera as interações complexas entre elementos naturais e atividades humanas. Este enfoque proporciona uma visão abrangente da região, fundamentando a pesquisa sobre a dinâmica dos bancos de areia entre Aveiro e Itaituba, e contribuindo para a compreensão e gestão sustentável desse ecossistema fluvial.

#### **4.1 Bacias hidrográficas do Rio Tapajós**

O Rio Tapajós, um dos principais cursos d'água, está localizado no município de Aveiro e é amplamente utilizado como uma rota fluvial para alcançar outros municípios na região. A altitude na região varia de aproximadamente 900 m nas nascentes da bacia até 50 m acima do nível do mar, próximo à sua foz no rio Amazonas (FIGUEIREDO, 2016).

Ao longo de seu percurso, o rio Tapajós atravessa diversas paisagens, drenando suas águas em diferentes relevos, desde quedas d'água, corredeiras e cachoeiras (especialmente entre Itaituba e a foz de Jamanxim) até uma planície bastante ampla, com margens arenosas que, no verão, se transformam em belas praias de areia branca (ROCHA et al., 2022). Com uma extensão de 840 km, o rio Tapajós é um significativo afluente da margem direita do rio Amazonas (BRUNCKHORST, 2022).

Seus principais afluentes incluem os rios Jamanxim, Crepori, Teles Pires e Juruena (BRUNCKHORST, 2022), com áreas de drenagem de 190.931 km<sup>2</sup> e 141.718 km<sup>2</sup>, respectivamente. Na região central da bacia, a Serra do Cachimbo corta a mesma, influenciando a drenagem do rio Teles Pires para oeste e fazendo com que o rio Tapajós siga um longo trecho próximo ao divisor de águas com a bacia hidrográfica do rio Madeira (FIGUEIREDO, 2016).

A bacia hidrográfica do Tapajós (Figura 7) abrange 532 mil km<sup>2</sup> nos estados do Mato Grosso (59%), Pará (18%), Amazonas (3%) e uma pequena porção de Rondônia (<1%), representando 6% do território brasileiro (BRUNCKHORST, 2022). Estende-se entre as latitudes 2° e 15° Sul e 53° e 61° Oeste, apresentando uma área de drenagem de 493.200 km<sup>2</sup>, com uma configuração alongada no sentido longitudinal (FIGUEIREDO, 2016).

Segundo Rocha et al. (2022), a bacia hidrográfica do rio Tapajós é uma das cinco maiores sub-bacias de todo o sistema amazônico, cobrindo quase 500 mil quilômetros quadrados (8% da bacia da Amazônia). Ela é a quarta maior em termos de drenagem líquida, com uma descarga média anual de 13.500 m<sup>3</sup> de água por segundo, ocorrendo após a confluência do Juruena e Teles Pires, próximo ao paralelo 7° 30' de latitude sul (FIGUEIREDO, 2016).

A partir desse ponto, após percorrer uma extensão de 851 km, as águas do rio Tapajós desembocam na margem direita do rio Amazonas. O trecho final do rio Tapajós tem seu regime de níveis e vazões impactado pelo remanso do Amazonas e pela influência da maré. Localiza-se a leste da bacia hidrográfica do rio Madeira e a oeste da bacia do rio Xingu, sendo uma parte integrante das Regiões Norte e Centro-Oeste do território nacional (Figura 7) (ROCHA *et al.*, 2022).

**Figura 7 –** Bacia do Rio Tapajós.



Fonte: Rocha et al (2022).

## 4.2 Clima

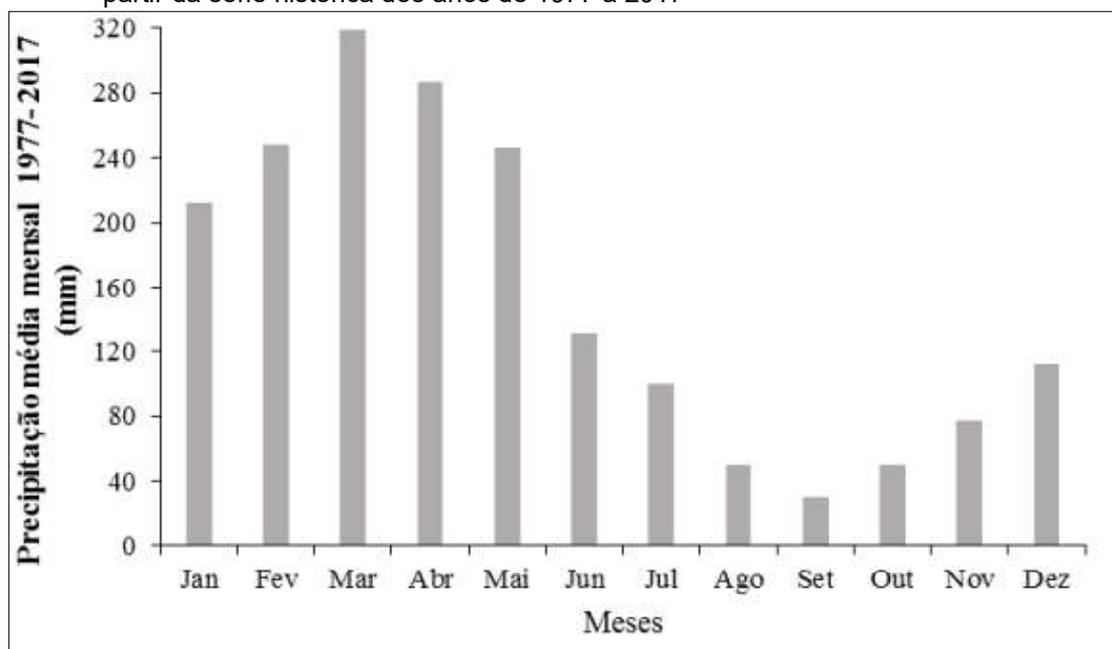
Devido à proximidade com a linha do Equador, Silva (2020) destaca que a região possui apenas duas estações bem definidas ao longo do ano, conhecidas como verão e inverno amazônicos. Essas estações estão associadas aos períodos de estiagem e de chuva intensa, respectivamente. Na bacia hidrográfica, composta principalmente pelos rios Tapajós e Juruena, o clima é caracterizado como quente e úmido, sendo o período das chuvas, denominado "inverno" na linguagem regional, ocorrendo entre janeiro e junho (ROCHA et al., 2022).

O "verão", caracterizado pelo período mais seco, ocorre entre julho e dezembro, com pico em setembro e outubro, podendo haver variações conforme a região da bacia hidrográfica (ROCHA et al., 2022). De acordo com Figueiredo (2016), os maiores valores de temperatura do ar são registrados normalmente de setembro a novembro, influenciados pela reduzida cobertura de nuvens e alta incidência solar, entre outros fatores climáticos atuantes na região.

Nos meses de janeiro a abril, observa-se uma pequena redução nos valores da temperatura média do ar devido aos fatores meteorológicos associados às precipitações que estão em plena atividade durante o período chuvoso (FIGUEIREDO, 2016). Conforme a classificação climática de Köppen-Geiger, a bacia hidrográfica do rio Tapajós apresenta duas tipologias climáticas distintas (BRUNCKHORST, 2022).

A classe Am, definida como tropical de monção, caracteriza-se por uma estação seca breve e chuvas intensas durante o restante do ano, apresentando uma média pluviométrica anual de 2.000 mm. Essa tipologia prevalece na parte baixa da bacia. Por outro lado, a classe Aw, com chuvas mais intensas no verão e média pluviométrica de 1800 mm/ano, abrange a porção alta da bacia hidrográfica (BRUNCKHORST, 2022). A precipitação total anual atinge cerca de 3.000 mm, sendo que a maior parte dessa precipitação ocorre entre os meses de dezembro a maio (Figura 8) (SILVA, 2020).

**Figura 8** – Valores de precipitação média mensal para a região de estudo no baixo rio Tapajós a partir da série histórica dos anos de 1977 a 2017



Fonte: Silva (2020)

O clima predominante desde as nascentes até o centro da bacia é classificado como "Aw", caracterizado por chuvas no verão, típico das savanas. Do centro para a foz, o clima é classificado como "Am", ou seja, clima tropical de monção, com uma estação seca e chuvas intensas durante o restante do ano. Na área de clima "Am", os meses com menor precipitação são de maio a outubro (DOS SANTOS; BLANCO; OLIVEIRA JÚNIOR, 2019).

No clima "Aw", a estação seca ocorre de abril a setembro, sendo julho o mês com o valor mais baixo de precipitação em ambas as tipologias, com médias de 36 mm/ano e 6 mm/ano, respectivamente (DOS SANTOS; BLANCO; OLIVEIRA JÚNIOR, 2019). Segundo Rocha et al (2022), essas diferenças climáticas podem ser exemplificadas pela comparação dos dados meteorológicos entre as estações de Itaituba (PA) e Diamantino (MT).

Na região de Itaituba (Baixo Tapajós), a média anual de precipitação é de 2.189 mm, com três meses secos (<60 mm) e seis meses de déficit hídrico (de junho a outubro). Por outro lado, em Diamantino (rio Arinos, afluente do Juruena, na parte mais meridional da bacia do Tapajós) a média anual de precipitação de 1.736 mm, com cinco meses secos (<80 mm, dos quais três meses com pouquíssima chuva acumulada) e déficit hídrico de seis meses entre maio e novembro (ROCHA et al., 2022). Na bacia hidrográfica do rio Tapajós, o regime de precipitação segue características peculiares aos regimes tropicais. Este é caracterizado por um período

chuvoso que abrange o verão, e um período seco compreendendo os meses de inverno e primavera. Durante o período chuvoso, ocorrem chuvas de grande intensidade, com precipitações mensais que podem ultrapassar 300 mm (FIGUEIREDO, 2016).

De acordo com Rocha et al. (2022), ao considerar uma série meteorológica de 40 anos (1982-2012), a bacia hidrográfica do rio Tapajós apresenta precipitação média de 1.920 mm e um balanço hídrico caracterizado por uma evapotranspiração potencial maior (1.054 mm) do que a drenagem das águas (866 mm), refletindo uma relação evaporação/precipitação de 55%. Essa maior evapotranspiração em relação à vazão das águas é uma característica das principais sub-bacias da margem direita do rio Amazonas.

De acordo com Sousa (2023), o menor período de continuidade para eventos de El Niño (EN) foi de cinco meses (nov/58 a mar/59, set/77 a jan/78 e out/79 a fev/80), classificados como intensidade fraca. Para os anos de La Niña (LN), o período foi de cinco meses (agosto a dezembro de 2016), também classificado como intensidade fraca. Já a maior duração para EN foi de 19 meses (novembro de 2014 a maio de 2016) e para LN foi de 32 meses (julho de 1998 a fevereiro de 2001), ambos classificados como intensidade forte.

### **4.3 Parâmetros Meteorológicos**

#### **4.3.1 Temperaturas do ar**

Conforme Figueiredo (2016), a bacia hidrográfica do rio Tapajós está situada na zona equatorial da América do Sul. A área abrangida pela bacia apresenta um padrão uniforme de temperatura média do ar, com médias anuais de 26,7°C e uma pequena variação sazonal, não sendo registradas médias mensais inferiores a 21°C. De acordo com Silva (2020), a temperatura média anual é de 27°C, com pouca variação na temperatura do ar, umidade, pressão atmosférica e velocidade do vento, devido à localização em latitude tropical próxima à linha do Equador.

A Hidrovia do Rio Tapajós é influenciada por um regime climático típico da floresta tropical, caracterizado por grandes volumes de precipitação distribuídos sazonalmente. As chuvas desempenham um papel fundamental na dinâmica hidrológica do rio, influenciando diretamente os níveis d'água, a formação de bancos de areia e a navegabilidade Salati & Vose, (1984).

#### 4.3.2 Precipitações

A precipitação na região do Rio Tapajós segue um padrão sazonal bem definido, com duas estações principais: o período chuvoso, que geralmente ocorre entre os meses de novembro e abril, e a estação seca, de maio a outubro. Durante a estação chuvosa, as chuvas intensas aumentam significativamente o volume de água no rio, causando elevação nos níveis d'água e expandindo as áreas inundadas, principalmente nas várzeas ao longo do curso do rio. Esse aumento no volume de água facilita a navegação, permitindo o trânsito de embarcações de maior calado em trechos que, durante a estação seca, podem apresentar restrições (MOLINIER et al., 1996).

No entanto, as chuvas também trazem desafios. O aumento do fluxo de água contribui para a erosão das margens e a redistribuição dos sedimentos, o que pode levar à formação de novos bancos de areia e alterações na profundidade de trechos importantes para a navegação. Além disso, enchentes podem causar obstruções temporárias de rotas fluviais, aumentando os riscos para a segurança das embarcações.

No entanto, as chuvas também trazem desafios. O aumento do fluxo de água contribui para a erosão das margens e a redistribuição dos sedimentos, o que pode levar à formação de novos bancos de areia e alterações na profundidade de trechos importantes para a navegação. Além disso, enchentes podem causar obstruções temporárias de rotas fluviais, aumentando os riscos para a segurança das embarcações (TUCCI, 2008).

Durante o período seco, caracterizado por chuvas bastante reduzidas, são registrados totais mensais precipitados abaixo de 60 mm. (Figura 11), a distribuição espacial das precipitações mostra um total anual médio da ordem de 1.900 mm (FIGUEIREDO, 2016).

Segundo Figueiredo (2016), no sentido de latitudes decrescentes, observam-se valores crescentes de chuva à medida que se dirige para montante e em direção à confluência dos rios Juruena e Teles Pires. Nessa parte específica da bacia hidrográfica, nota-se a presença de um núcleo chuvoso regional, onde os índices pluviométricos chegam a totalizar 2.700 mm ao ano.

De acordo com Dos Santos, Blanco e Oliveira Júnior (2019), foram identificadas oito regiões com probabilidade de ocorrência de chuvas por meio de técnicas de agrupamento. Essa identificação revela a diferença no comportamento específico de cada estação de chuva dentro da Bacia do Rio Tapajós. A inserção da análise da probabilidade de ocorrência para diferentes volumes de chuva, de acordo com a variação anual, é recomendada. Para atividades agrícolas, a definição dessas regiões auxilia na identificação de locais com períodos de seca e chuva semelhantes, otimizando seu planejamento.

A variação do regime fluvial do rio Tapajós não se destacou como um fator determinante para comprometer as condições de balneabilidade. As alterações na qualidade da água desencadeadas por eventos de precipitação são discretas, não comprometendo a conformidade, e a resiliência do rio é restaurada imediatamente após 24 horas dos últimos eventos de chuva (LEMOS, 2019).

#### 4.3.3 Ventos

No contexto amazônico, o vento também desempenha um papel significativo na dinâmica fluvial e na segurança da navegação. O padrão de ventos na região amazônica, incluindo o Rio Tapajós, é influenciado por sistemas atmosféricos de grande escala, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e o anticiclone subtropical do Atlântico Sul (MARENGO; ESPINOZA, 2016). Em geral, os ventos na Amazônia têm intensidades moderadas, mas sua direção e velocidade variam ao longo do ano, conforme as estações climáticas se alteram. Durante a estação seca, ventos alísios de sudeste tendem a predominar, enquanto, na estação chuvosa, a ZCIT move-se para o norte, alterando os padrões de circulação atmosférica e influenciando os ventos regionais (TOMASELLA et al., 2013).

Embora o Rio Tapajós esteja em uma região cercada por floresta densa, que atua como uma barreira natural para ventos muito fortes, os ventos podem afetar a navegação fluvial de várias maneiras. Ventos mais fortes, especialmente em áreas mais abertas do rio, podem criar ondas e correntes superficiais, que dificultam o controle das embarcações menores, como balsas e barcos de pesca (JUNK et al., 2011). Isso é particularmente perigoso durante a estação seca, quando o nível das águas é mais baixo e as embarcações devem navegar em canais mais estreitos.

Além disso, ventos laterais podem desviar embarcações de suas rotas planejadas, o que pode ser arriscado em áreas onde bancos de areia ou rochas submersas estão presentes (FEARNSIDE, 2006). Durante manobras em portos ou áreas de carga e descarga, rajadas de vento podem dificultar a atracação, exigindo maior habilidade dos navegantes e aumentando o risco de acidentes.

O vento também afeta a hidrodinâmica do Rio Tapajós ao interagir com a superfície da água, gerando pequenas ondulações e correntes de superfície que, embora sutis, podem impactar a redistribuição de sedimentos no leito do rio. Em áreas de várzea ou lagos próximos, ventos prolongados podem criar correntes suficientes para influenciar a deposição de sedimentos, o que, por sua vez, altera a profundidade e a navegabilidade de trechos específicos ao longo da hidrovia (TOMASELLA et al., 2013).

Esses efeitos podem se intensificar em trechos mais largos do rio, onde o impacto dos ventos na superfície da água é mais pronunciado, especialmente em locais onde a vegetação ribeirinha foi reduzida devido a atividades humanas, como o desmatamento para agricultura ou mineração (FEARNSIDE, 2006). Para a segurança e eficiência do transporte fluvial na Hidrovia do Tapajós, é fundamental que as operações de navegação considerem as condições de vento, especialmente durante períodos em que esses ventos possam ser mais intensos.

A instalação de sistemas de monitoramento climático ao longo da hidrovia pode ajudar a prever mudanças bruscas nas condições atmosféricas, permitindo que as autoridades emitam alertas para os navegantes e ajustem as rotas ou as operações portuárias conforme necessárias (JUNK et al., 2011). Além disso, práticas sustentáveis de conservação das margens do rio, com o controle do desmatamento, podem ajudar a manter as barreiras naturais contraventos fortes, reduzindo os RISCOS associados a ventos intensos em áreas mais vulneráveis da hidrovia (Fearnside, 2006).

Embora o vento não seja o fator mais destacado nas discussões sobre a navegabilidade do Rio Tapajós, ele exerce influências importantes que não podem ser ignoradas. Desde o impacto na segurança das embarcações até a redistribuição de sedimentos no leito do rio, o vento contribui para a complexa dinâmica fluvial da hidrovia. Um monitoramento adequado e a adoção de estratégias de gestão integrada são essenciais para mitigar os efeitos negativos dos ventos sobre a navegação, garantindo a segurança e a sustentabilidade da hidrovia.

#### 4.4 Aspectos Geológicos

Nos últimos 100 kms de sua extensão, o rio Tapajós apresenta considerável largura e profundidade devido à sua inserção na Formação de Alter do Chão, que constitui a unidade superior da Bacia Sedimentar do Amazonas. Essa formação é caracterizada por sedimentação cretácea e dominação de arenitos, argilitos e conglomerados. A Formação Alter do Chão é a maior aflorante da bacia sedimentar do Amazonas e abriga um aquífero de grandes dimensões que se estende desde o Rio Xingu até o Rio Madeira, fornecendo água para cidades como Manaus (AM) e Aveiro (PA) (ROCHA et al., 2022).

A bacia do Rio Tapajós é composta principalmente por rochas do Cráton Amazônico, que datam do Pré-Cambriano. Essas rochas, predominantemente ígneas e metamórficas, formam a base geológica da região, apresentando variações em termos de resistência à erosão e permeabilidade, influenciando a formação do relevo e os padrões de drenagem (LIMA; COSTA, 2019).

O processo de sedimentação ao longo do Rio Tapajós é significativo, especialmente em áreas de várzea e nas margens do rio. A dinâmica das cheias e secas contribui para a deposição de sedimentos aluviais, que são essenciais para a formação de ilhas e bancos de areia (SANTOS; FERREIRA, 2017). A composição dos sedimentos varia, incluindo partículas de areia, silte e argila, o que afeta a qualidade da água e a vegetação ripária.

O sistema fluvial do Rio Tapajós é influenciado pela geologia local, que determina o comportamento do rio em diferentes épocas do ano. Durante a estação chuvosa, as cheias são intensas, e a erosão das margens é acentuada, enquanto na estação seca, a exposição de áreas alagadas leva à formação de novos bancos de areia (SILVA; SOUZA, 2021). Essa dinâmica é crucial para a navegabilidade da hidrovia e para a biodiversidade local.

A região ao redor do Rio Tapajós é rica em recursos minerais, incluindo ouro, bauxita e outros minerais metálicos. A exploração desses recursos tem impactos significativos na geologia local e na qualidade da água, sendo um fator a ser considerado na gestão ambiental da hidrovia (MCTI, 2020).

#### 4.5 Tipos de Solos

Na bacia hidrográfica do rio Tapajós, os principais tipos de solo compreendem solos litólicos, areias quartzosas, latossolos, podzólicos, solos de várzea, solos concrecionários e cambissolos (Figura 9) (FIGUEIREDO, 2016). Segundo Figueiredo (2016), os latossolos constituem a maior parcela de área na bacia, correspondendo a 41%. Os solos podzólicos, predominantemente argilosos, ocupam 29% da área da bacia, enquanto as areias quartzosas (Neossolos Quartzarênicos) representam 19%. Solos litólicos, ou leptossolos, juntamente com afloramentos rochosos, respondem por 6% da área total. Solos hidromórficos, aluviais e gleissolos correspondem a 2% do total, e cambissolos, solos concrecionários (plintossolos) e áreas aquáticas ocupam 1% cada.

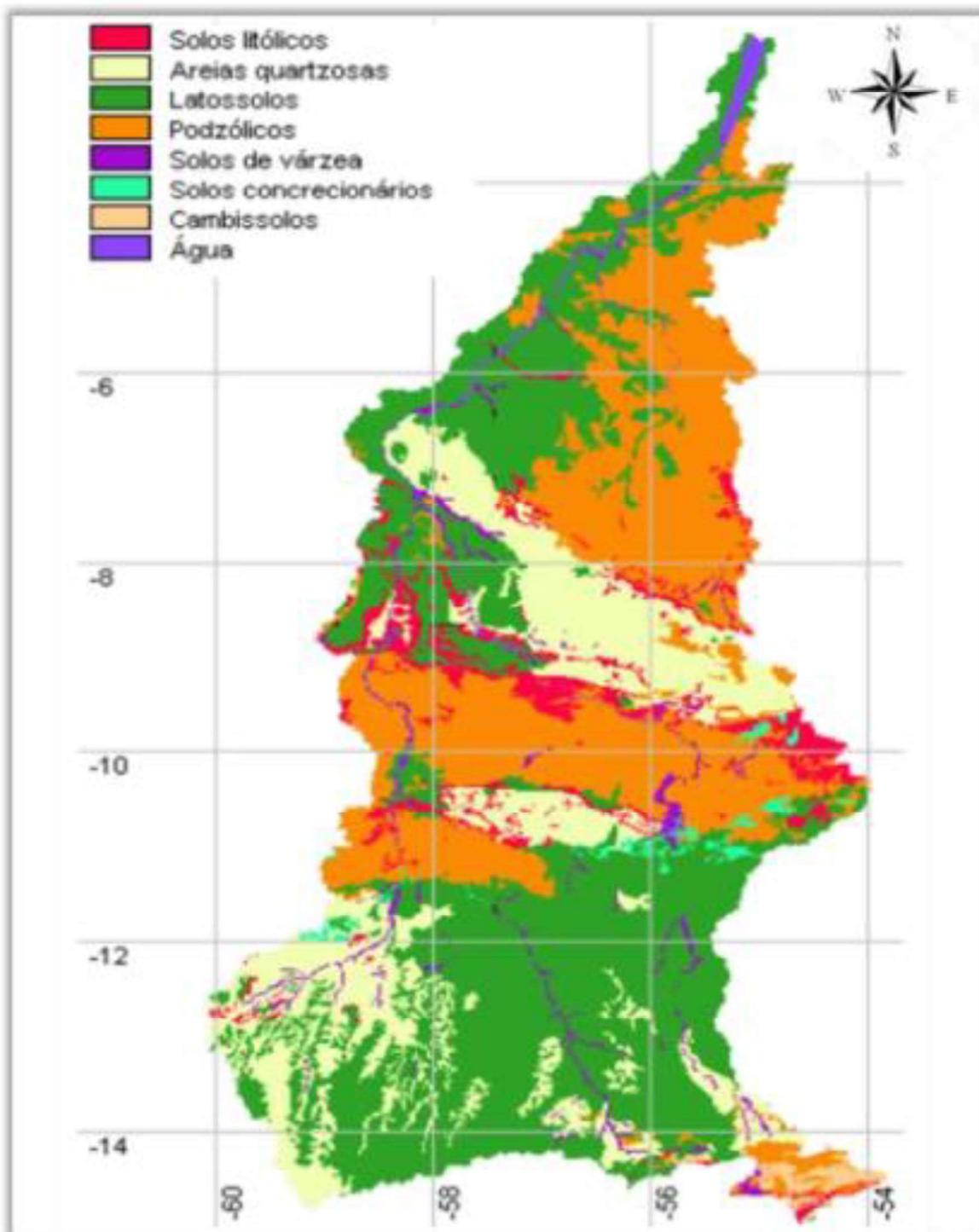
Esses solos podem ser agrupados em 5 categorias (FIGUEIREDO, 2016). O primeiro grupo engloba solos litólicos, caracterizados por alta capacidade de escoamento superficial, encontrados em terrenos montanhosos, incluindo afloramentos rochosos. O segundo grupo inclui latossolos, solos profundos com capacidade de armazenamento e alto teor de argila.

O terceiro grupo compreende solos argilosos, sendo menos profundos que os do segundo grupo, com capacidade de drenagem moderada, destacando-se o podzólico, cambissolos e concrecionários. O quarto grupo abrange as areias quartzosas, solos altamente porosos com boa capacidade de armazenamento e drenagem. O quinto e último grupo engloba solos típicos de várzea, profundos, mas com dificuldade relativa de drenagem, como os solos gleisados, areias quartzosas hidromórficas e solos aluviais (FIGUEIREDO, 2016).

Há uma predominância de 75% de cobertura florestal, mais notável ao norte, na região do baixo Tapajós. Ao Sul, próximo ao norte do Mato Grosso, existe uma área significativa de pastagens, correspondendo a cerca de 10% da área total da bacia hidrográfica. Cerca de 7% da área total apresenta solo com pouca cobertura. Em toda a bacia hidrográfica, observam-se focos de cultivo agrícola ou vegetação rasteira, totalizando cerca de 10% do território. Os cursos d'água cobrem 1% da bacia hidrográfica (Figura 10) (FIGUEIREDO, 2016).

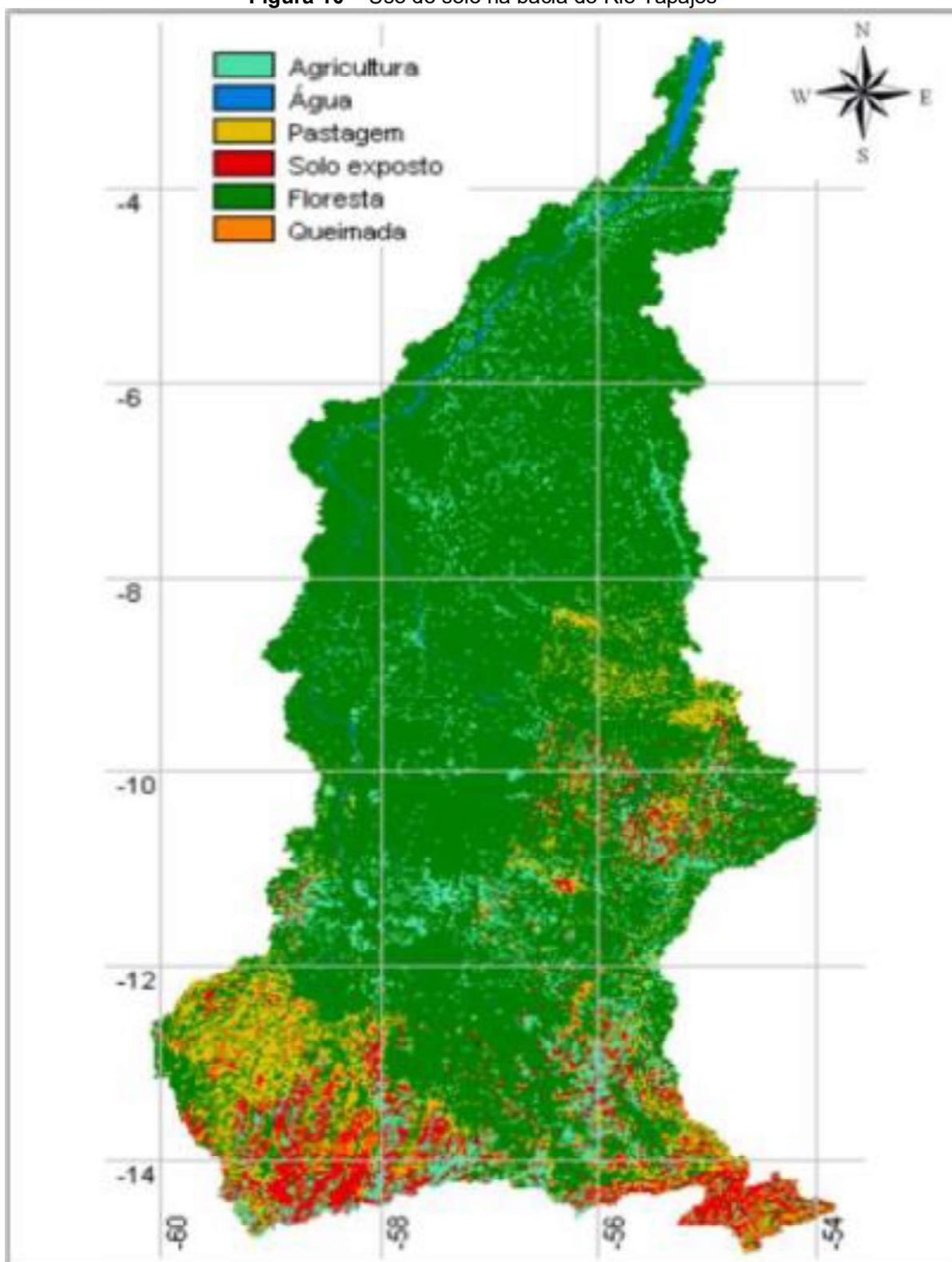
A variação dos tipos de solo na Hidrovia do Rio Tapajós reflete a complexidade dos ecossistemas presentes e a importância dessas características para a navegabilidade e o uso sustentável dos recursos naturais. A compreensão dessas dinâmicas é essencial para a gestão adequada da hidrovia e a mitigação de impactos ambientais (SILVA; SOUZA, 2021).

**Figura 9** – Tipos de solo da bacia do Rio Tapajós



Fonte: Figueiredo (2016)

Figura 10 – Uso do solo na bacia do Rio Tapajós

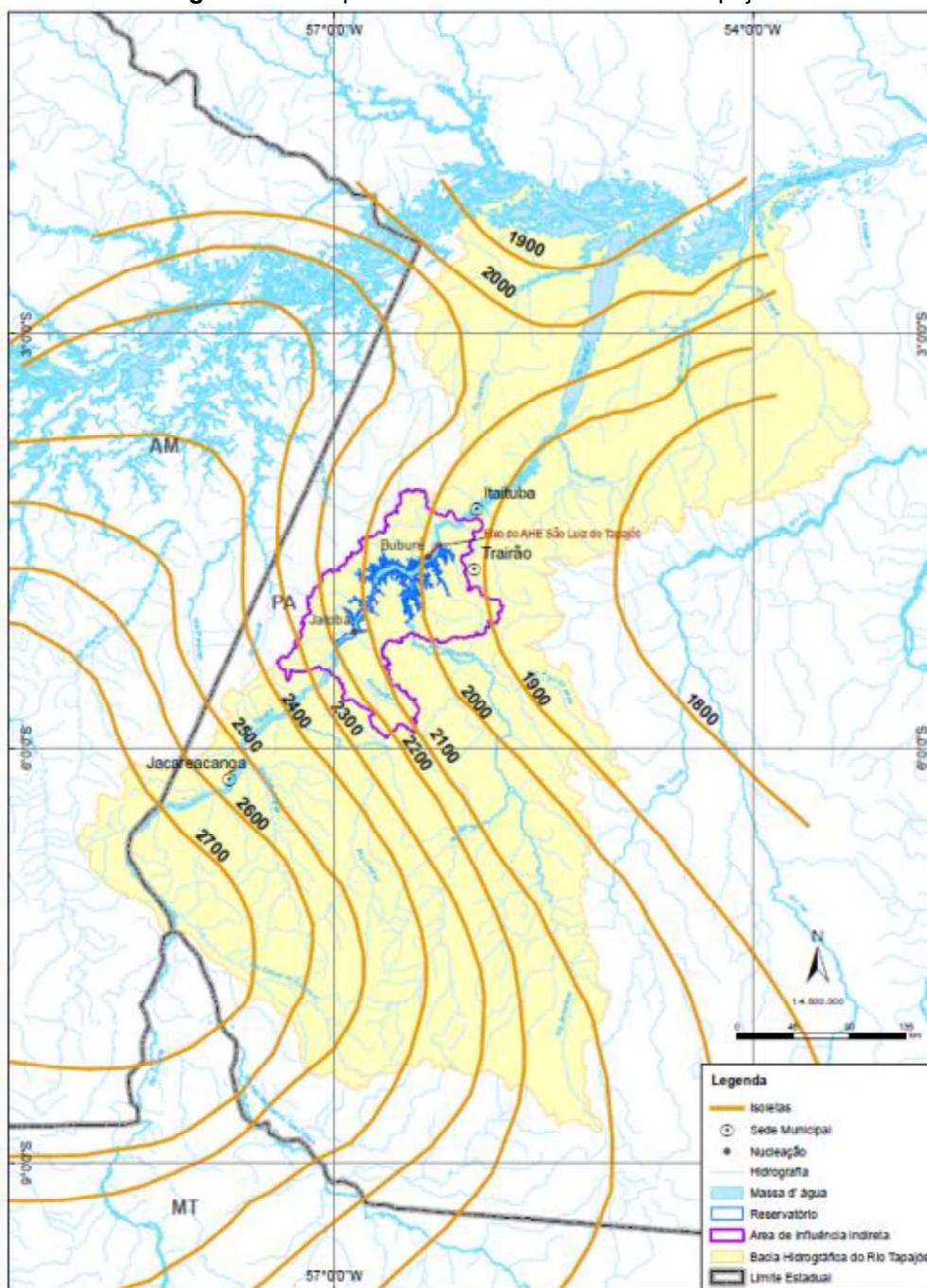


Fonte: Figueiredo (2016)

## 4.6 Condições hidrológicas

Rocha et al. (2022) argumentam que, como ocorre com outros rios amazônicos, o rio Tapajós apresenta uma dinâmica hidrológica bem-marcada, dividida entre a época da enchente e da vazante, dependendo do volume de chuvas anuais, o que é conhecido como "pulso de inundação", sendo que na parte mais a montante, o rio começa a subir em setembro ou início de outubro, atingindo os níveis máximos em março ou abril.

**Figura 11** – Mapa de isoietas da bacia do Rio Tapajós

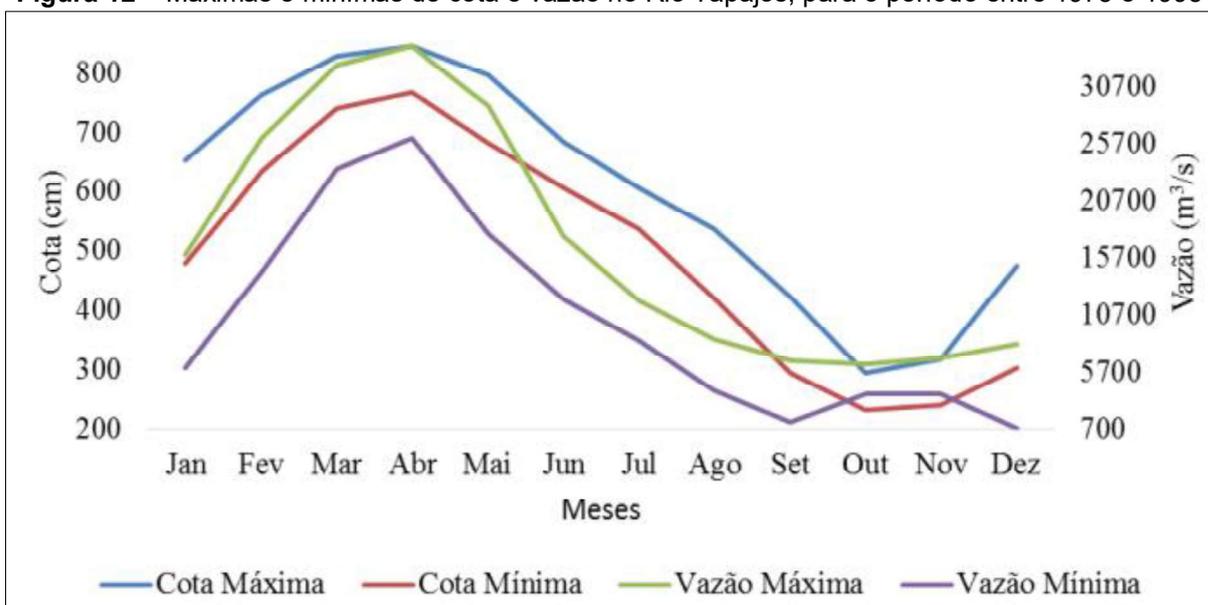


Fonte: Figueiredo (2016)

Segundo Santos et al. (2015), os valores máximos e mínimos de cota e vazão mostram que tanto a cota quanto a vazão atingem seus valores máximos em abril, com 845 cm e 34.233 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

O valor mínimo de cota ocorre em outubro, com 232 cm, enquanto o valor mínimo de vazão é registrado em setembro, atingindo 1.303 m<sup>3</sup>/s (Figura 12). Além disso, identificou-se uma curva chave, com alto coeficiente de ajuste ( $R^2=0,9915$ ), relacionando os dados de cota fluviométrica e a vazão média mensal do rio Tapajós na estação de Itaituba. Essa curva chave da estação fluviométrica de Itaituba apresenta desvios nos meses de agosto a dezembro, quando a vazão no posto atinge 7.000 m<sup>3</sup>/s (SANTOS et al, 2015).

**Figura 12** – Máximas e mínimas de cota e vazão no Rio Tapajós, para o período entre 1975 e 1995



Fonte: Santos et al. (2015)

Ao contrário do rio Amazonas, que possui coloração marrom e águas mais turvas, o rio Tapajós é notório por suas águas claras, azuladas e transparentes, com uma visibilidade que pode atingir quase 3 m de profundidade. Essa distinção na densidade das águas de cada rio torna-se evidente no famoso "encontro das águas", ocorrido em frente à cidade de Aveiro. Nesse fenômeno, as águas claras do rio Tapajós não se misturam com as águas escuras do rio Amazonas (Figura 13) (ROCHA et al., 2022).

**Figura 13** – Imagem aérea do encontro das águas do Rio Tapajós com as águas do Rio Amazonas



Fonte: Rocha *et al.* (2022)

Conforme Rocha *et al.* (2022), a disparidade na turbidez das águas entre os rios Tapajós e Amazonas é atribuída às características geológicas, variações geomorfológicas e hidrológicas das regiões por onde fluem, e o perfil de equilíbrio e a geomorfologia de um rio são influenciados por diversos fatores, incluindo volume, carga da corrente fluvial, declividade e clima.

#### **4.7 Condições Ambientais**

Existem 74 municípios na bacia hidrográfica do rio Tapajós, distribuídos entre dois no Amazonas, 60 no Mato Grosso, 11 no Pará e um em Rondônia. Entre esses, 49 possuem sedes localizadas dentro da própria bacia, abrigando uma população estimada em 1,5 milhão de habitantes. Os municípios mais populosos são Aveiro/PA (306.480 habitantes), Sinop/MT (146.005 habitantes), Itaituba/PA (101.395 habitantes), Sorriso/MT (92.769 habitantes) e Lucas do Rio Verde/MT (67.620 habitantes) (BRUNCKHORST, 2022).

De acordo com Brunckhorst (2022), a economia da região está centrada na atividade agropecuária, com destaque para pastagens e cultivo de grãos na parte mais elevada da bacia hidrográfica, predominantemente nos municípios do Mato Grosso. Já na porção média e baixa da bacia, prevalecem o extrativismo florestal e a mineração. Nos últimos anos, tem-se observado um aumento significativo no cultivo

de soja na região próxima à foz do rio Tapajós. A área minerada, estimada em 57.631 hectares (MAPBIOMAS, 2017), concentra-se principalmente nos municípios de Itaituba/PA, Jacareacanga/PA, Peixoto Azevedo/MT e Matupá/MT.

Nas áreas mais baixas da bacia hidrográfica do Tapajós, as florestas são frequentemente inundadas durante o período chuvoso do ano, sendo que as matas de igapós abrigam espécies endêmicas e maioria das pesquisas sobre a biodiversidade do rio Tapajós está concentrada no trecho que vai de Itaituba a Aveiro (ROCHA et al., 2022).

Na Floresta Nacional do Tapajós, uma das unidades de conservação mais estudadas da Amazônia, localizada na margem direita do rio Tapajós, estima-se a presença de 342 espécies de aves, 135 de mamíferos e mais de uma centena de répteis. Destacam-se, nas décadas de 1970 e 1980, alguns estudos sistemáticos de fauna no Parque Nacional da Amazônia (margem esquerda do rio Tapajós) com registros de 448 espécies de aves e 101 de mamíferos (ROCHA et al., 2022).

Rocha et al. (2022) afirmam que a bacia hidrográfica do Tapajós apresenta uma diversidade de peixes extraordinariamente vasta, com a constante descoberta de novas espécies, muitas das quais são endêmicas da parte sul da bacia. Destaca-se recentemente a identificação de duas novas espécies de peixes no rio Cupari, afluente do rio Tapajós (município de Rurópolis: o acari *Hypostomus labyrinthus* e a piaba *Knodus cupariensis*).

De acordo com Lemos (2019), as condições de qualidade da água nas principais praias do baixo rio Tapajós, incluindo o balneário de Alter do Chão, encontram-se em conformidade adequada, embora a variação da qualidade da água balnear seja um fenômeno influenciado pelo contexto geográfico, sendo que as praias mais próximas do centro urbano apresentam maior degradação de qualidade.

De acordo com Oliveira (2022), nenhuma amostra de água do rio Tapajós ultrapassou o limite máximo recomendado pela OMS de 24 µg/L para água de recreação. No entanto, é preocupante a presença de cianotoxinas em várias amostras, especialmente considerando o consumo diário dessas águas pelas comunidades ribeirinhas. Conforme o autor, os resultados da Análise de Componentes Principais (ACP) indicam um maior ordenamento da presença de Microcistinas (MCs) durante os períodos de vazante (Set-2021) e seca (Nov-2021), com maior influência dos vetores de temperatura, pH e extinção do disco de Secchi.

Os registros de maiores valores de fósforo total durante a enchente e cheia sugerem que as cianobactérias começam a se desenvolver e se reproduzir rapidamente, utilizando esse nutriente. Posteriormente, muitas delas, por serem fixadoras de nitrogênio, conseguem se manter nos períodos fluviométricos seguintes (vazante e seca) (OLIVEIRA, 2022).

Silva (2020) observou que a diversidade específica de cianobactérias atingiu níveis mais elevados durante o período de menor pluviosidade, correspondente aos menores níveis de cota do rio. Como resultado, concluiu que o aumento da turbidez durante a estação chuvosa altera as condições de iluminação da água e a penetração da radiação solar, impactando diretamente na fotossíntese e no crescimento do fitoplâncton e da vegetação aquática. Nesse contexto, Silva (2020) acredita ser possível que durante o período de estiagem, especialmente na fase de vazante e águas baixas, as maiores riquezas de cianobactérias tenham ocorrido devido às condições de menor turbidez, considerando condições mais favoráveis de aproveitamento da radiação solar, conforme evidenciado pelo aumento da temperatura da água associado à redução do nível da água.

Conforme Figueiredo (2016), a bacia do rio Tapajós está situada na zona equatorial da América do Sul. A área abrangida pela bacia apresenta um padrão uniforme de temperatura média do ar, com médias anuais de 26,7°C e uma pequena variação sazonal, não sendo registradas médias mensais inferiores a 21°C. De acordo com Silva (2020), a temperatura média anual é de 27°C, com pouca variação na temperatura do ar, umidade, pressão atmosférica e velocidade do vento, devido à localização em latitude tropical próxima à linha do Equador.

Segundo Tucci (2008), a temperatura da água no Rio Tapajós pode variar de acordo com as estações do ano, refletindo as oscilações climáticas locais. Durante o verão amazônico, com temperaturas atmosféricas mais elevadas, a água pode aquecer de forma mais acentuada, atingindo valores em torno de 28°C a 30°C. Nos períodos chuvosos, há uma tendência de resfriamento relativo, embora a amplitude térmica seja geralmente pequena, considerando o regime equatorial predominante na região.

Essas variações de temperatura têm impactos diretos sobre a ecologia aquática. Temperaturas elevadas reduzem os níveis de oxigênio dissolvido na água, afetando a sobrevivência de espécies sensíveis, especialmente em áreas mais rasas e com menor fluxo de água. Adicionalmente, a dinâmica dos bancos de areia, uma característica marcante do Tapajós, também pode ser influenciada pela temperatura, uma vez que alterações na densidade da água afetam os processos de sedimentação e erosão (PETRY et al, 2003).

Portanto, a temperatura da água na Hidrovia do Tapajós é um parâmetro importante tanto para a saúde do ecossistema quanto para a operação segura da navegação fluvial. A manutenção de um equilíbrio entre a conservação ambiental e as necessidades de transporte é fundamental para garantir a sustentabilidade dessa via de grande relevância para a Amazônia e para o Brasil, (MEDEIROS; LOPES, 2013).

#### **4.8 Logísticas**

O acesso à área de estudo tem início a partir de Belém em direção a Santarém, sendo possível optar pelo transporte aéreo ou hidroviário. Uma vez em Santarém, a opção mais viável é o acesso por via hidroviária. Essa modalidade possibilita a chegada à área de trabalho através do principal rio, o Tapajós, utilizando barcos de médio e pequeno calado (Figura 14) ou lanchas rápidas movidas a motor. No entanto, é importante ressaltar que esse acesso é frequentemente dificultado devido às limitações de horário das embarcações disponíveis.

**Figura 14** – Tipo de embarcações para acesso Hidroviário na área de Estudo



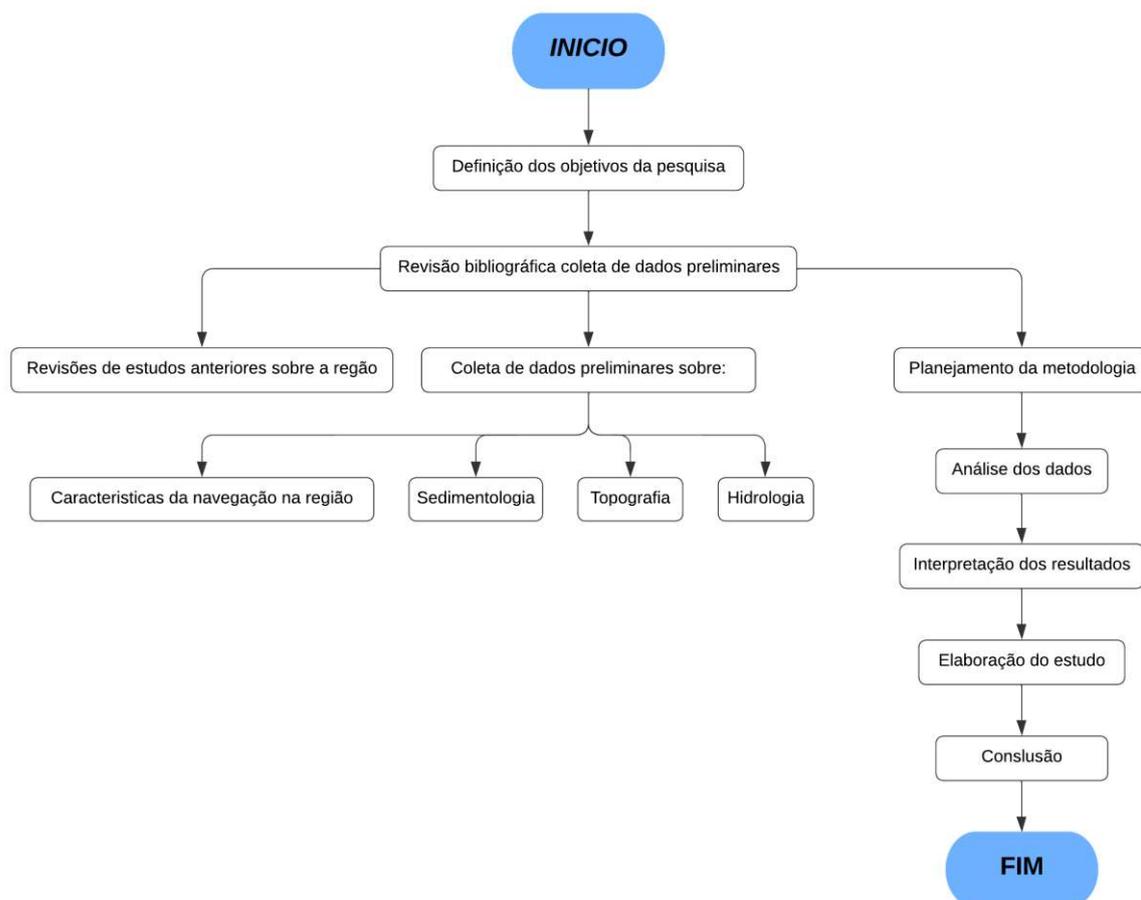
Fonte: Própria Autora (2024).

## 5. METODOLOGIA

A área de estudo abrange o trecho da Hidrovia do Rio Tapajós, localizado entre os municípios de Itaituba e Aveiro (Pará). Este trecho é caracterizado por um regime sazonal, com variações significativas de nível d'água e a presença de bancos de areia que influenciam diretamente a navegabilidade.

Para abordar essa complexidade, a metodologia adotada neste estudo foi estruturada de maneira clara e sistemática, visando proporcionar um processo de pesquisa e coleta de dados robusto. A abordagem utilizada foi cuidadosamente planejada, com passos bem definidos que garantem a construção e a aplicação adequadas das principais etapas envolvidas na pesquisa (Figura 15). Essa metodologia também inclui uma descrição detalhada das ferramentas e técnicas utilizadas, buscando assegurar uma compreensão abrangente do contexto e dos objetivos da análise.

**Figura 15** – Fluxograma da Metodologia Adotada no Estudo



**Fonte:** Elaborado pela Autora (2024).

## 5.1 Procedimentos Pré-Coleta de Dados

### 5.1.1 Testes de Precisão dos Equipamentos DGPS

Antes do início da coleta de dados em campo, foram realizados testes de precisão no equipamento DGPS (Sistema de Posicionamento Global Diferencial) (Figura 16). Esse teste visa garantir a precisão das coordenadas geográficas durante os levantamentos batimétricos. O procedimento foi realizado nas Referências de Nível (RRNN) mais próximas da área de levantamento. O DGPS foi posicionado sobre uma RRNN e permaneceu por alguns minutos, permitindo que o equipamento fixasse as coordenadas com precisão. Este procedimento foi repetido ao final do levantamento para validar a precisão das medições realizadas ao longo do trabalho de campo.

**Figura 16** – Testes do DGPS para a verificação da precisão da posição.



Fonte: a própria Autora (2024)

## 5.2 Aquisições dos dados de campo

### 5.2.1 Levantamentos batimétrico monofeixe

O levantamento batimétrico monofeixe foi conduzido para caracterizar a topografia subaquática do trecho estudado. Utilizando equipamentos de sonar monofeixe, foram obtidas medições detalhadas da profundidade do leito do rio. Este levantamento foi realizado em períodos de águas altas e baixas, aplicando as devidas correções de nível para o NR local e portando eliminando a interferência das variações de nível.

Os dados para o levantamento batimétrico foram coletados em conformidade com os requisitos legais, de acordo com a Categoria “B” para levantamentos hidrográficos, autorizada pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), conforme o Art. 37 do Decreto-Lei nº 243/1967. A Normam-501/DHN (Edição 2023) classifica os

levantamentos em Categoria “A”, voltada à atualização de cartas náuticas e segurança da navegação, e Categoria “B”, destinada a outros propósitos, como a quantificação da mobilidade do leito.

Os serviços seguiram rigorosamente as normas da NORMAM-501/DHN e a publicação S-44 da Organização Hidrográfica Internacional (OHI), aplicando-se a levantamentos de Ordem 1b. O sistema utilizado incluiu ecobatímetro monofeixe, GPS diferencial (DGPS) e o software Hypack (versão 2020) (Figura 17), assegurando alta precisão nos dados e conformidade com os mais altos padrões de qualidade. A calibração dos equipamentos, incluindo ecobatímetro e DGPS, foi conduzida diariamente, com ajustes realizados sempre que necessário.

Durante as coletas, foram adotados os seguintes parâmetros de aquisição de dados para o levantamento batimétrico monofeixe

- Frequência Ecobatímetros = 200 kHz;
- Frequência de Amostragem = 10 Hz;
- Precisão dos Ecobatímetros = 0,1% da profundidade; e
- Imersão dos Transdutores (Draft) = conforme adotado em campo.

**Figura 17** – Fotos dos equipamentos utilizado no levantamento batimétrico monofeixe:  
1 - DGPS, 2 - Ecobatímetro, 3 - caixa com transdutor e 4 - Software Hypack

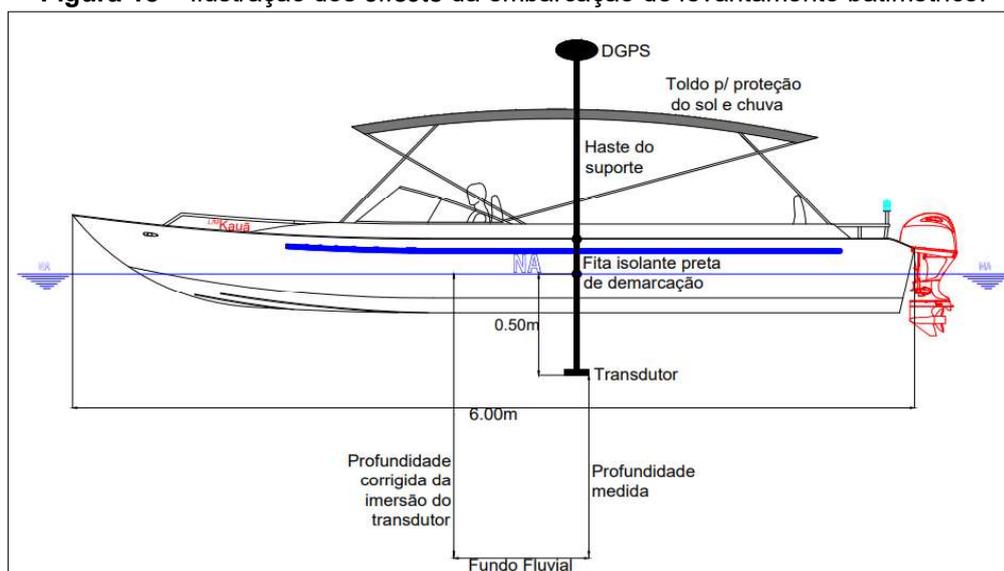


Fonte: Site dos Fabricantes (2023)

Além disso, todos os testes de verificação de precisão foram realizados antes e após o levantamento, utilizando pontos de referência previamente rastreados (RRNN).

As embarcações de levantamento, foram montadas com a utilização de uma haste, acoplado em um dos bordos das embarcações, com a utilização de uma chapa “L” e sargentos de metal. De forma a reduzir a introdução de *offsets*, as antenas dos DGPS, foram instaladas na mesma haste, que foi afixada o transdutor do ecobatímetro (Figura 18 e Figura 19).

**Figura 18** – Ilustração dos *offsets* da embarcação de levantamento batimétrico.



**Fonte:** Elaborado pela Autora (2024)

**Figura 19**– Disposições do sistema monofeixe instalado a bordo da lancha de 40 Hp, utilizada durante a campanha.



**Fonte:** Elaborado pela Autora (2024)

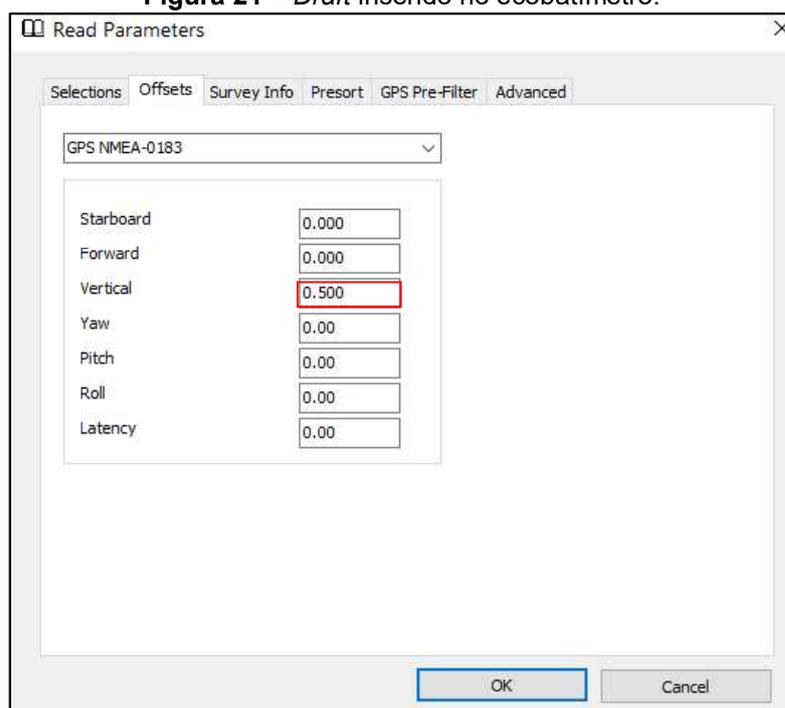
Após a instalação da haste de levantamento, o *notebook*, foi acondicionado em local próximo ao comando da embarcação, de modo a fornecer visada ao marinheiro (piloto da embarcação) e ao Técnico de batimetria, que acompanhava os registros analógicos do ecobatímetro monofeixe (Figura 20). Foram imersos os transdutores (draft) em 0,5m (Figura 21).

**Figura 20** – Notebooks próximo ao comando da embarcação e DGPS



Fonte: a própria Autora (2024)

**Figura 21** – Draft inserido no ecobatímetro.

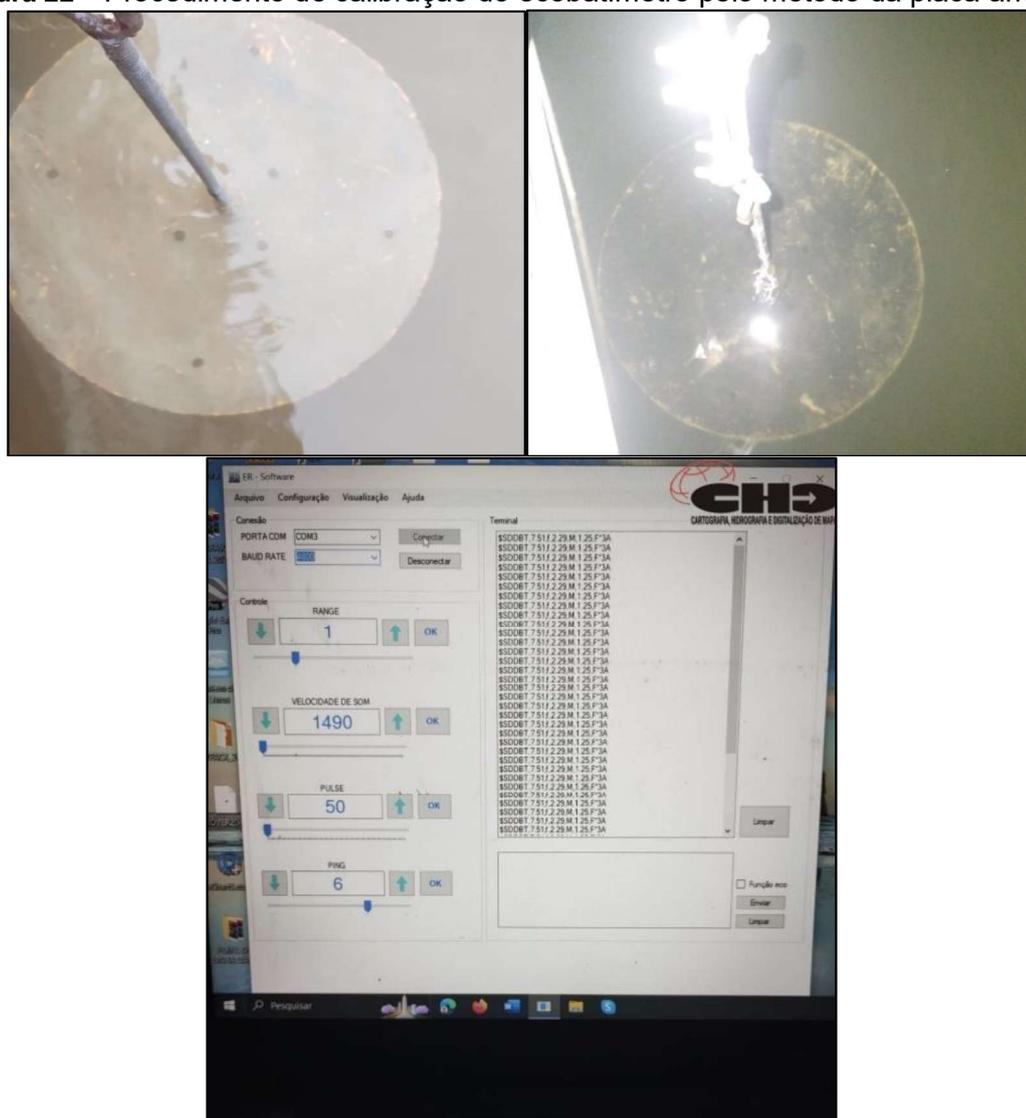


Fonte: Hypack (2024)

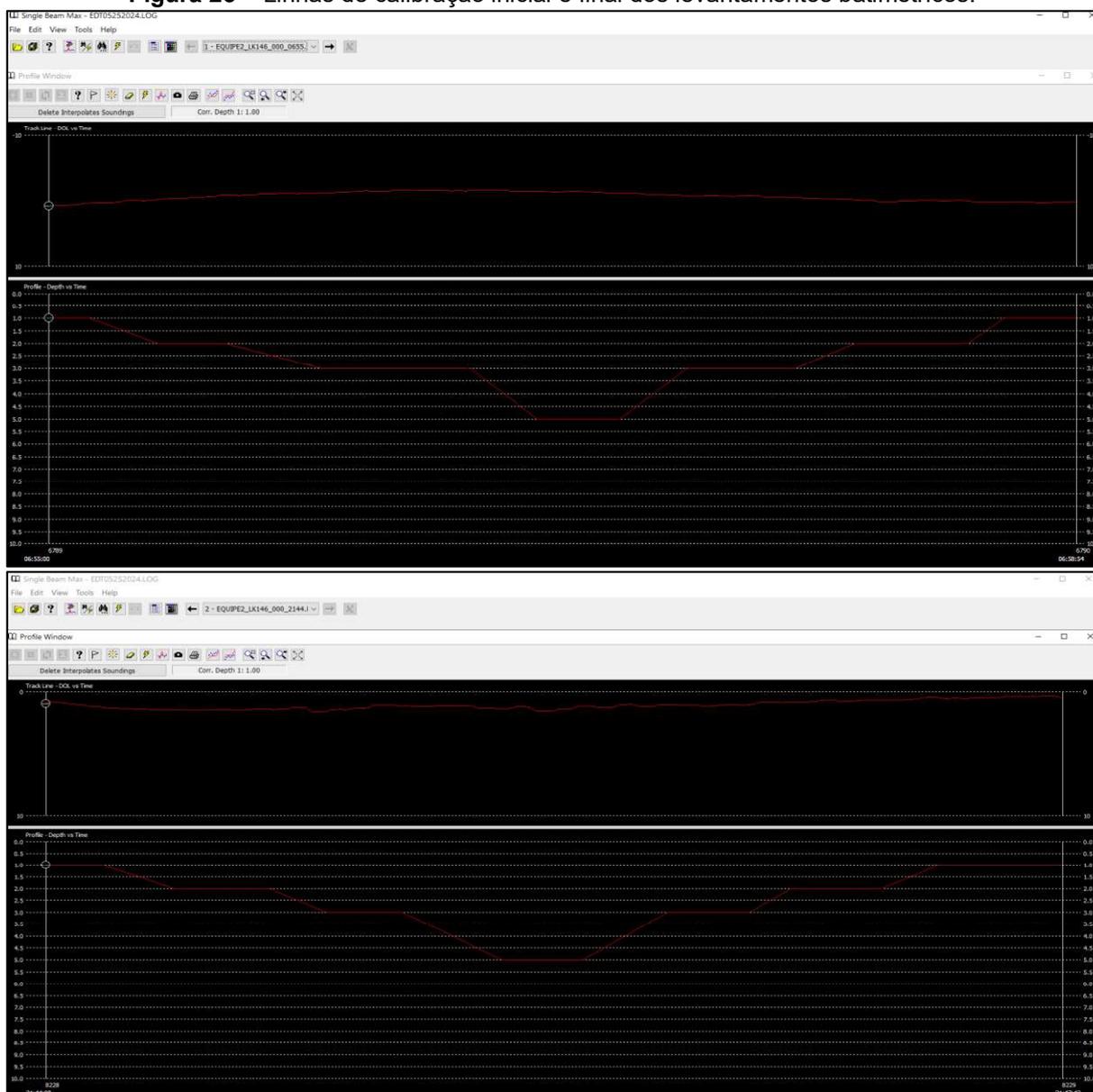
Antes do início de cada jornada de levantamento, a calibração é realizada utilizando o método da placa arriada. São feitas medições em diferentes profundidades (1, 2, 3 e 5 m) para ajustar a velocidade do som e garantir a acurácia do sistema. Nessa etapa, verifica-se também se a profundidade de imersão do transdutor está corretamente configurada no software de aquisição. Caso haja discrepâncias, ajustes são feitos antes de iniciar a coleta de dados.

Ao término de cada dia de coleta, uma nova calibração é realizada nos mesmos parâmetros para confirmar a consistência dos dados ao longo do levantamento. Caso alguma variação seja detectada nos resultados, é avaliado se os dados precisam ser corrigidos ou recalibrados, garantindo que as medições ao longo do dia permaneçam precisas.

**Figura 22 –** Procedimento de calibração do ecobatímetro pelo método da placa arriada.



**Fonte:** a própria Autora (2024)

**Figura 23** – Linhas de calibração inicial e final dos levantamentos batimétricos.

Fonte: Hypack (2024)

Essas calibrações são fundamentais para garantir que qualquer variação nos equipamentos ou condições ambientais, como mudanças na velocidade do som na água, seja devidamente compensada, assegurando a qualidade e precisão dos levantamentos batimétricos.

O operador deste sistema desempenha um papel fundamental nesse processo, monitorando os registros de profundidade com uma frequência de amostragem de 10Hz. Além disso, ele é responsável por ajustar o ganho e a potência do sinal, a fim de otimizar a qualidade dos dados coletados. No entanto, durante essa operação, o operador muitas vezes se depara com desafios significativos, como a presença de dados espúrios e perda de sinal devido a vários fatores.

### 5.3 Processamento de dados do levantamento batimétrico com monofeixe

O processamento de dados batimétricos é um procedimento sistemático que envolve várias etapas essenciais. Inicialmente, cria-se um arquivo de configuração da embarcação, seguido pela criação de um projeto no qual os dados brutos são importados para análise. Em seguida, aplicam-se correções de velocidade do som e maré, garantindo a precisão e a confiabilidade dos resultados. Ao final desse processo, uma superfície digital é gerada, possibilitando a visualização acessível dos dados obtidos (HYPACK, 2020).

A metodologia utilizada para processar e interpretar os dados envolve o uso de softwares especializados, sendo o Hypack (2020) o principal programa empregado neste estudo. Esse software não apenas facilita a verificação da consistência dos dados, mas também permite a atualização das cartas náuticas, conforme os requisitos da Marinha do Brasil. Além do Hypack, programas como Quinsy e Caris HIPS and SIPS são amplamente utilizados, contribuindo para a robustez da análise (QUINSY, 2021; CARIS, 2021).

O processamento de dados provenientes de levantamentos batimétricos realizados com sonar monofeixe é fundamental para a análise detalhada do leito de corpos d'água, como rios, lagos e oceanos. Essa técnica de medição, que utiliza pulsos de som para determinar a profundidade, oferece uma série de benefícios categóricos para diversos setores.

Primeiramente, a precisão na medição de profundidades é uma das principais vantagens do uso de sonar monofeixe. Essa tecnologia permite obter dados exatos sobre o fundo do corpo d'água, essencial para garantir a segurança da navegação e o planejamento de atividades de dragagem, além de possibilitar uma melhor avaliação dos recursos hídricos disponíveis (ASSINE, 2003).

O mapeamento do leito do rio é outra aplicação significativa do processamento de dados batimétricos. Através da interpretação dos dados coletados, é possível gerar mapas detalhados que revelam características do fundo, como bancos de areia, depressões e obstáculos subaquáticos. Essas informações são vitais para a gestão da navegabilidade e a realização de intervenções em infraestrutura, como a construção de portos e canais (GUIMARÃES; SOUZA FILHO, 2005).

Além disso, o processamento de dados batimétricos é essencial para a avaliação de impactos ambientais. Compreender a topografia do leito ajuda a identificar as consequências de atividades humanas, como a construção de barragens e a dragagem, permitindo uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos e a preservação dos ecossistemas aquáticos (LATRUBESSE; STEVAUX; SINHA, 2005).

Outro aspecto importante é a contribuição dos dados batimétricos para estudos hidrodinâmicos. Esses estudos ajudam a prever o comportamento da água em diferentes condições, como cheias e secas, sendo fundamentais para a gestão de recursos hídricos e a mitigação de desastres naturais (ISAACKS; SRIVASTAVA, 1989).

A integração dos dados batimétricos a sistemas de informações geográficas (SIG) também é um ponto relevante. Essa integração permite análises espaciais mais complexas, possibilitando entender as relações entre o uso do solo nas margens do rio e a sedimentação ao longo do tempo.

O monitoramento contínuo das mudanças no leito do rio é outra aplicação significativa. O processamento regular de dados batimétricos possibilita a observação das dinâmicas de sedimentação e erosão, contribuindo para a compreensão dos efeitos de fenômenos naturais e das intervenções humanas.

Por fim, essas informações são cruciais para a tomada de decisões informadas por gestores públicos e privados. A utilização de dados processados fornece uma base sólida para políticas de gestão hídrica, conservação ambiental e desenvolvimento sustentável.

Em suma, o processamento de dados de levantamentos batimétricos com monofeixe é vital para a compreensão do ambiente aquático e para a implementação de estratégias eficazes de gestão e planejamento, promovendo a sustentabilidade e a segurança no uso dos recursos hídricos.

#### **5.4 Digitalizações da Carta Náutica de 1982**

As cartas náuticas de 1982 (CN 4382B e CN 4382A) foram digitalizadas para a criação de um modelo digital, utilizando os softwares QGIS e IDRISI, com o objetivo de comparar os dados de batimetria de 2023. O processo de digitalização envolveu a conversão das informações contidas nas cartas náuticas antigas para um formato digital, assegurando a preservação dos detalhes da topografia do leito do rio e dos

bancos de areia daquela época. Essa digitalização possibilitou uma comparação direta com os dados mais recentes, permitindo a análise das mudanças ocorridas ao longo do tempo.

### **5.5 Análise Comparativa do Levantamento batimétrico/2023 com as Cartas Náuticas/1982**

Os dados coletados passam por diversas fases de análise, incluindo a interpolação de superfícies batimétricas, o que resulta na criação de mapas de profundidade e modelos digitais do terreno subaquático (ISAACKS; SRIVASTAVA, 1989). O processamento também incorpora análises estatísticas, permitindo a comparação entre os dados batimétricos e as cartas náuticas, além da identificação de padrões de sedimentos. Essa análise comparativa concentra-se na dinâmica dos bancos de areia, na navegabilidade e nos impactos das atividades humanas. Um aspecto crucial dessa análise é a identificação de áreas de risco à navegação, o que leva à formulação de recomendações para a gestão sustentável da hidrovia do Tapajós (LATRUBESSE; STEVAUX; SINHA, 2005).

A comparação entre os dados batimétricos de 2023 e as cartas náuticas de 1982 (CN 4382B e CN 4382A) fornece uma visão abrangente das transformações ocorridas no leito do rio Tapajós ao longo das últimas quatro décadas. Os levantamentos batimétricos, realizados com sonar monofeixe, revelam detalhes precisos da topografia subaquática. A digitalização das cartas de 1982 permitiu a conversão dessas informações históricas em um formato digital, preservando a morfologia do leito do rio e dos bancos de areia da época.

A comparação dos dados revelou mudanças significativas na morfologia do leito do rio, incluindo o deslocamento e a formação de novos bancos de areia, bem como alterações nas profundidades em trechos críticos da hidrovia. Esses resultados refletem as dinâmicas ambientais que impactam a região, como as variações hidrológicas sazonais, a sedimentação e os efeitos de atividades humanas, incluindo dragagem e desmatamento (GUIMARÃES; SOUZA FILHO, 2005).

Essas transformações têm implicações diretas na navegabilidade do rio Tapajós, ressaltando a importância da análise contínua dos dados batimétricos para a gestão eficaz da hidrovia. Ao compreender as mudanças na geomorfologia do leito do rio ao longo do tempo, é possível implementar estratégias adequadas que

garantam a segurança da navegação e promovam a sustentabilidade dos recursos hídricos na região.

## **5.6 Interpolação por meio do método geoestatístico de Krigagem**

A Krigagem é um método de interpolação amplamente utilizado em geoestatística para a estimativa de valores de variáveis em locais não amostrados, a partir de dados conhecidos em pontos amostrados. Trata-se de uma técnica que se baseia na teoria de variáveis regionalizadas e modela a dependência espacial dos dados por meio da função semivariograma, permitindo que a interpolação seja feita considerando tanto a distância entre os pontos como a estrutura de correlação espacial (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978).

Este método de interpolação é classificado como um BLUE (Best Linear Unbiased Estimator – Melhor Estimador Linear Imparcial), pois garante que a estimativa seja linear, sem viés, e que minimize o erro de variância em relação aos dados disponíveis (CRESSIE, 1990).

### **5.6.1 Processo de interpolação por Krigagem:**

O primeiro passo para realizar a Krigagem é a construção do semivariograma, que descreve a variabilidade dos dados em função da distância entre os pontos amostrados. O semivariograma experimental é calculado com base nos pares de pontos de amostragem e indica o grau de similaridade entre os dados conforme a distância aumenta (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

A função do semivariograma pode ser ajustada a modelos teóricos como esférico, exponencial ou gaussiano, dependendo do comportamento observado nos dados (WEBSTER; OLIVER, 2007). Esse modelo ajustado é crucial, pois será utilizado no processo de ponderação das estimativas.

Após o ajuste do semivariograma, a Krigagem utiliza esse modelo para quantificar a dependência espacial entre os pontos amostrados e os locais onde a estimativa será feita. A dependência espacial é definida pela covariância ou pela função de correlação entre os pontos de amostra e os pontos a serem estimados (CRESSIE, 1990).

O processo de Krigagem atribui pesos a cada ponto amostrado com base na distância ao ponto a ser estimado e na estrutura de dependência espacial definida pelo semivariograma. Esses pesos são determinados de forma a garantir que a

interpolação seja imparcial e tenha o menor erro de variância possível (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978).

A fórmula geral da Krigagem pode ser expressa como:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

Onde:

$Z^*$  é o valor estimado do ponto  $x_0$

$\lambda_i$  são os pesos atribuídos a cada valor amostrado  $Z(x_i)$

$n$  é o número de pontos amostrados usados na estimativa

Os pesos  $\lambda_i$  são calculados de forma a garantir que a soma dos pesos seja igual a 1, garantindo que o estimador seja imparcial.

Com os pesos calculados, o valor da variável no ponto de interesse é estimado pela soma ponderada dos valores dos pontos vizinhos. Além da estimativa, a Krigagem também fornece uma estimativa da variância do erro, o que permite avaliar a incerteza associada à interpolação (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978).

No contexto deste estudo, a Krigagem foi aplicada para estimar variáveis hidro-sedimentológicas devido à ausência de amostragens diretas nas áreas de estudo. A partir da construção do semivariograma e da definição da estrutura de correlação espacial, foi possível realizar uma interpolação eficiente e precisa, respeitando a dependência espacial observada nos dados de campo.

O uso da Krigagem permitiu gerar uma superfície contínua dos dados, facilitando a análise das dinâmicas fluviais e sedimentares do Rio Tapajós. Essas informações fornecem subsídios essenciais para o planejamento da navegação e para a segurança da hidrovia.

## 5.7 Análise e Interpretação dos Resultados

### 5.7.1 Validação do Modelo de Interpolação

Antes de interpretar os resultados, é fundamental validar a acurácia do modelo de interpolação gerado pela Krigagem. Isso pode ser feito comparando os valores estimados com os valores observados em amostras pontuais ou utilizando técnicas de validação cruzada (cross-validation). Nesta análise, métricas como o erro quadrático médio (RMSE) e a variância dos erros podem ser úteis para verificar a qualidade da interpolação (WEBSTER; OLIVER, 2007).

Os resultados mostraram que o modelo de Krigagem conseguiu captar adequadamente a estrutura espacial dos dados, com erros relativamente baixos, o que valida a eficácia do método para o presente estudo.

### 5.7.2 Mapeamento e Distribuição Espacial dos Dados Interpolados

Com a superfície contínua gerada pela Krigagem, foi possível mapear a distribuição espacial das variáveis hidro-sedimentológicas ao longo do Rio Tapajós. Este mapeamento evidenciou áreas críticas com maior acúmulo de sedimentos, o que pode indicar uma maior propensão à formação de bancos de areia e redução da profundidade do rio em determinados trechos (CRESSIE, 1990).

As áreas com maior deposição de sedimentos foram encontradas nas proximidades de [nome das áreas], o que corrobora estudos anteriores que apontam para a influência de fatores hidrológicos e geológicos nesses pontos. Isso implica na necessidade de intervenções de dragagem mais frequentes nessas regiões, de modo a garantir a navegabilidade contínua.

### 5.7.3 Impactos na Navegabilidade

A análise dos resultados revelou que a variação espacial dos sedimentos interfere diretamente na profundidade disponível para a navegação, especialmente em períodos de seca, quando o nível do rio está mais baixo. Os trechos críticos identificados por meio da Krigagem indicam áreas onde a navegação pode ser mais desafiadora, especialmente para embarcações de grande calado (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

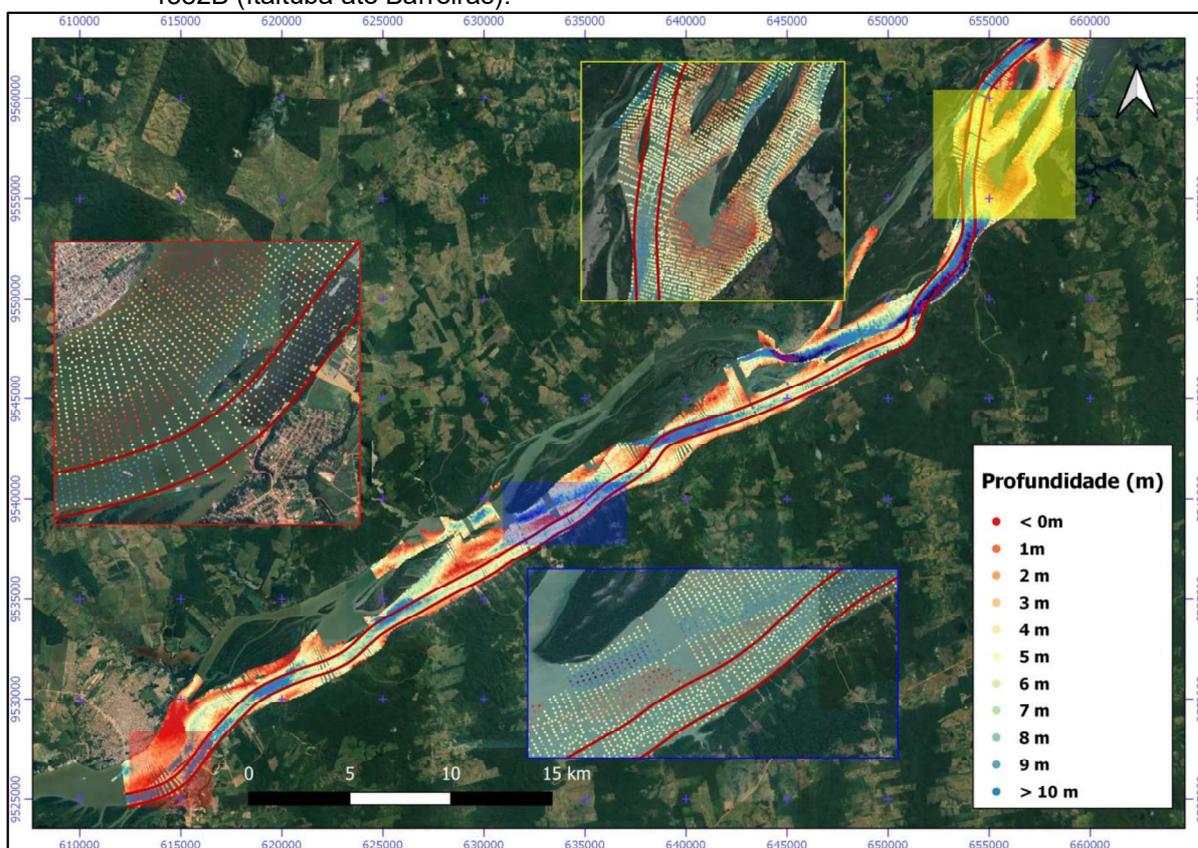
Esses resultados reforçam a importância de um monitoramento contínuo e de um planejamento adequado para a navegação fluvial, a fim de evitar acidentes e garantir a segurança na hidrovia.

#### 5.7.4 Relações com o Regime Hidrológico

A correlação entre a dinâmica dos sedimentos e o regime hidrológico também foi avaliada. Os resultados demonstraram que, durante os períodos de cheia, há uma maior dispersão de sedimentos ao longo do leito do rio, enquanto, nos períodos de seca, esses sedimentos tendem a se concentrar em regiões específicas, contribuindo para a formação de bancos de areia (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978). A análise espacial realizada confirma essa dinâmica e sugere uma estratégia de dragagem e manutenção que leve em conta a sazonalidade do regime hídrico.

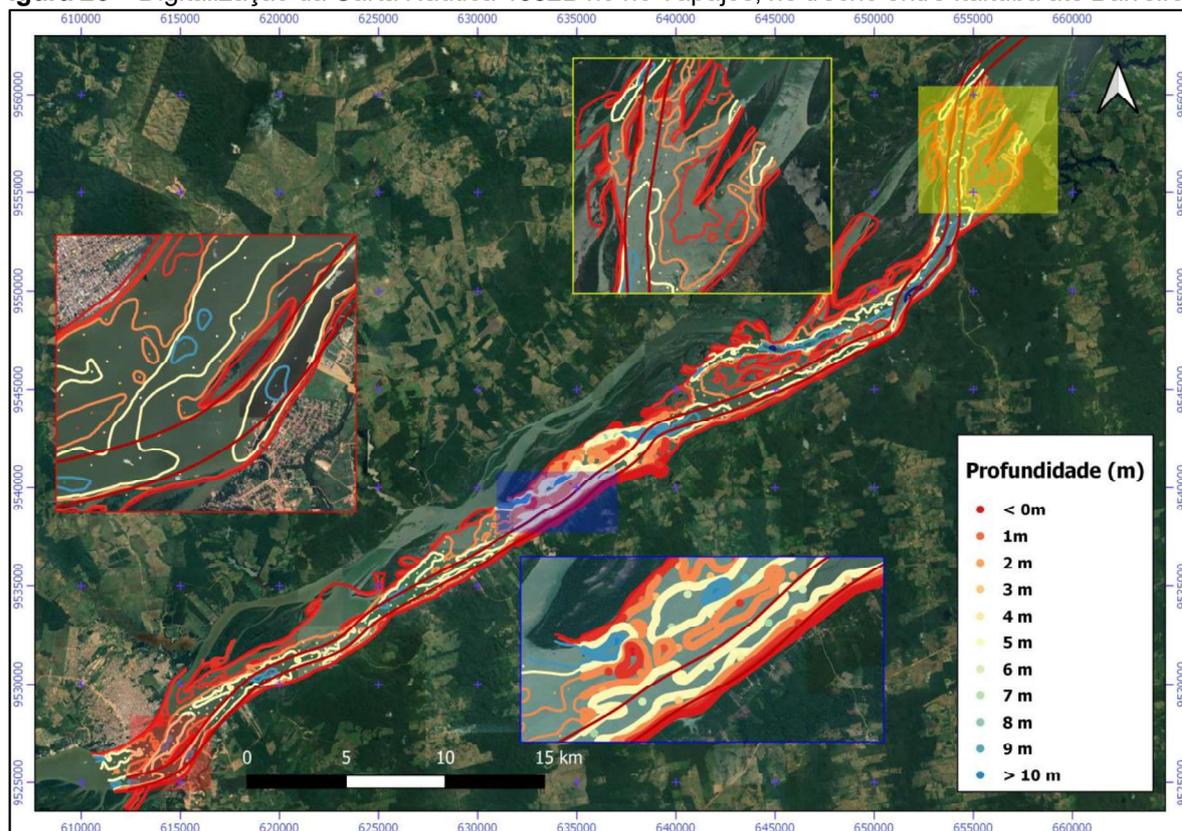
O Modelo de Elevação Digital (MED) foi gerado com uma resolução espacial de 25 metros. Isso significa que cada célula ou pixel do modelo corresponde a uma área de 25x25 metros no terreno. A resolução determina o nível de detalhamento do DEM: resoluções mais finas (com células menores, como 1 metro ou 5 metros) oferecem maior nível de detalhe, enquanto resoluções mais grossas (como 25 metros) proporcionam uma visão mais generalizada dos dados.

**Figura 24** – Mapa Batimétrico realizado em 2023 no rio Tapajós, no trecho coincidente com a CN 4382B (Itaituba até Barreiras).



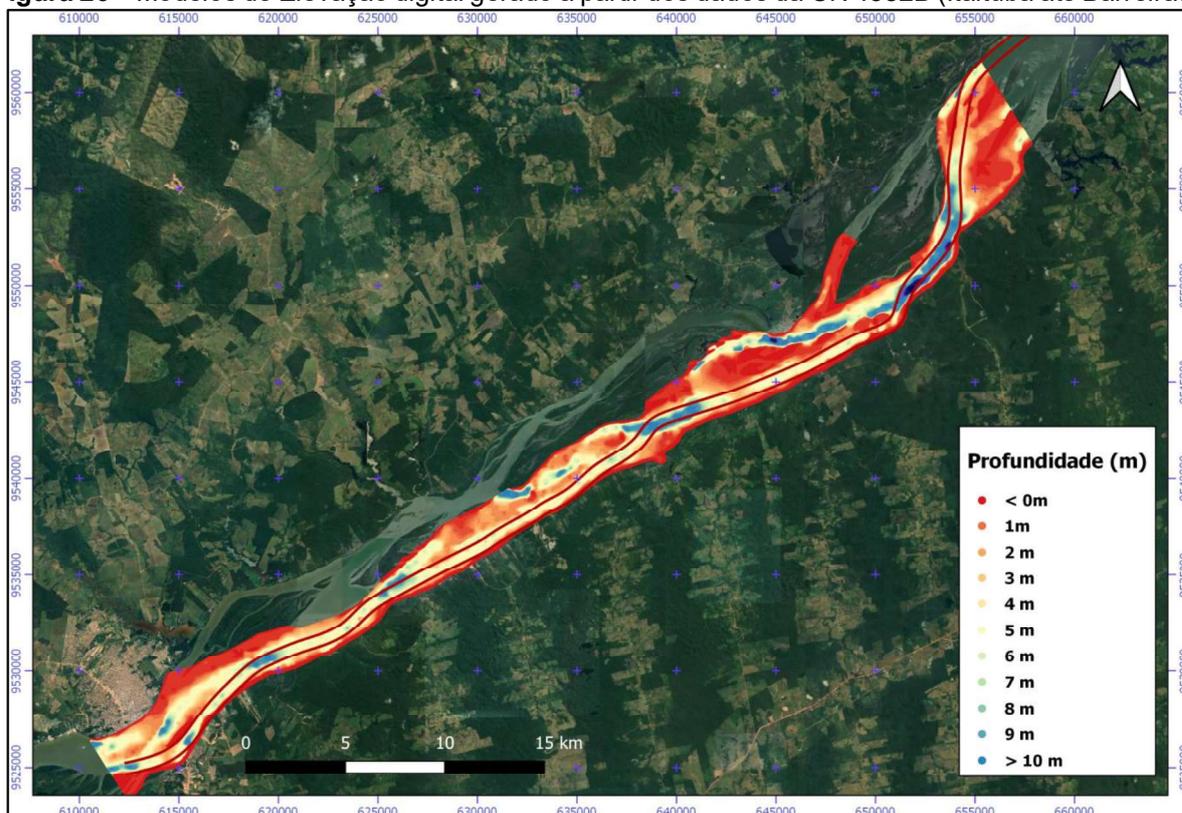
Fonte: Elaborado pela Autora (2024)

**Figura 25** – Digitalização da Carta Náutica 4382B no rio Tapajós, no trecho entre Itaituba até Barreiras.



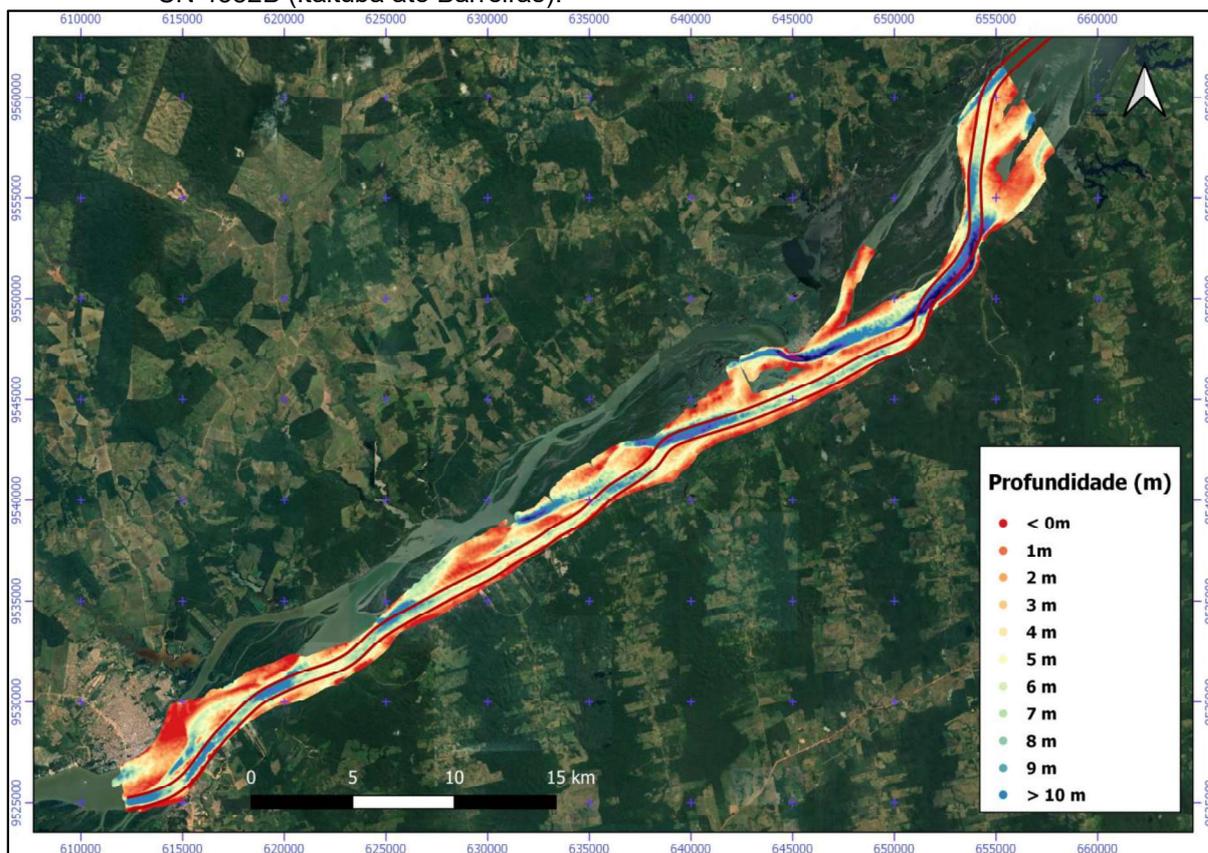
Fonte: Elaborado pela Autora (2024)

**Figura 26** – Modelos de Elevação digital gerado a partir dos dados da CN 4382B (Itaituba até Barreiras).



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

**Figura 27** – Modelos de Elevação digital da Batimetria de 2023 gerado no trecho coincidente com a CN 4382B (Itaituba até Barreiras).

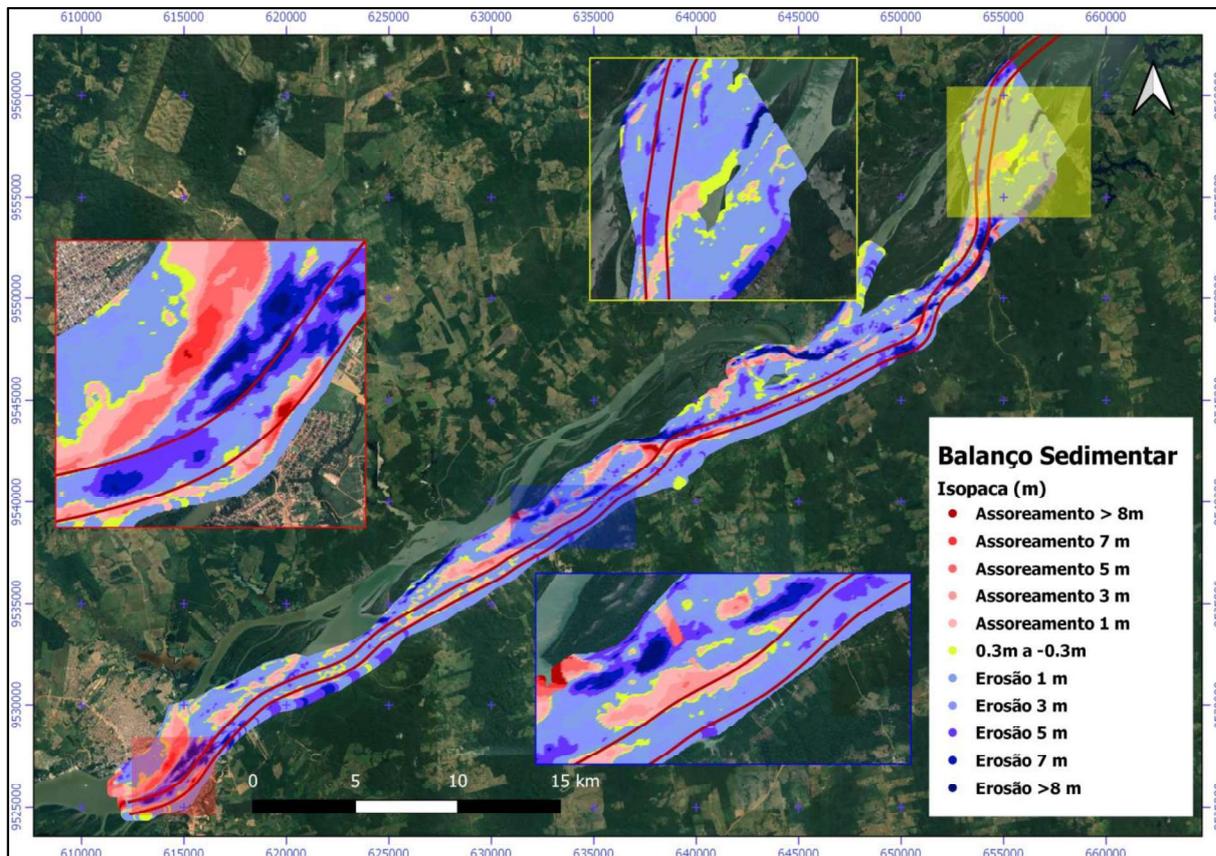


Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

### 5.7.5 Metodologia da Dinâmica sedimentar ao longo prazo

A partir da disponibilidade dos MED para ambas as datas (1982 e 2023) é possível então inferir as variações resultantes da mobilidade do leito nesse intervalo de tempo. Com isso foi realizada a comparação entre os MED gerando a distribuição espacial do Balanço Sedimentar (Figura 28).

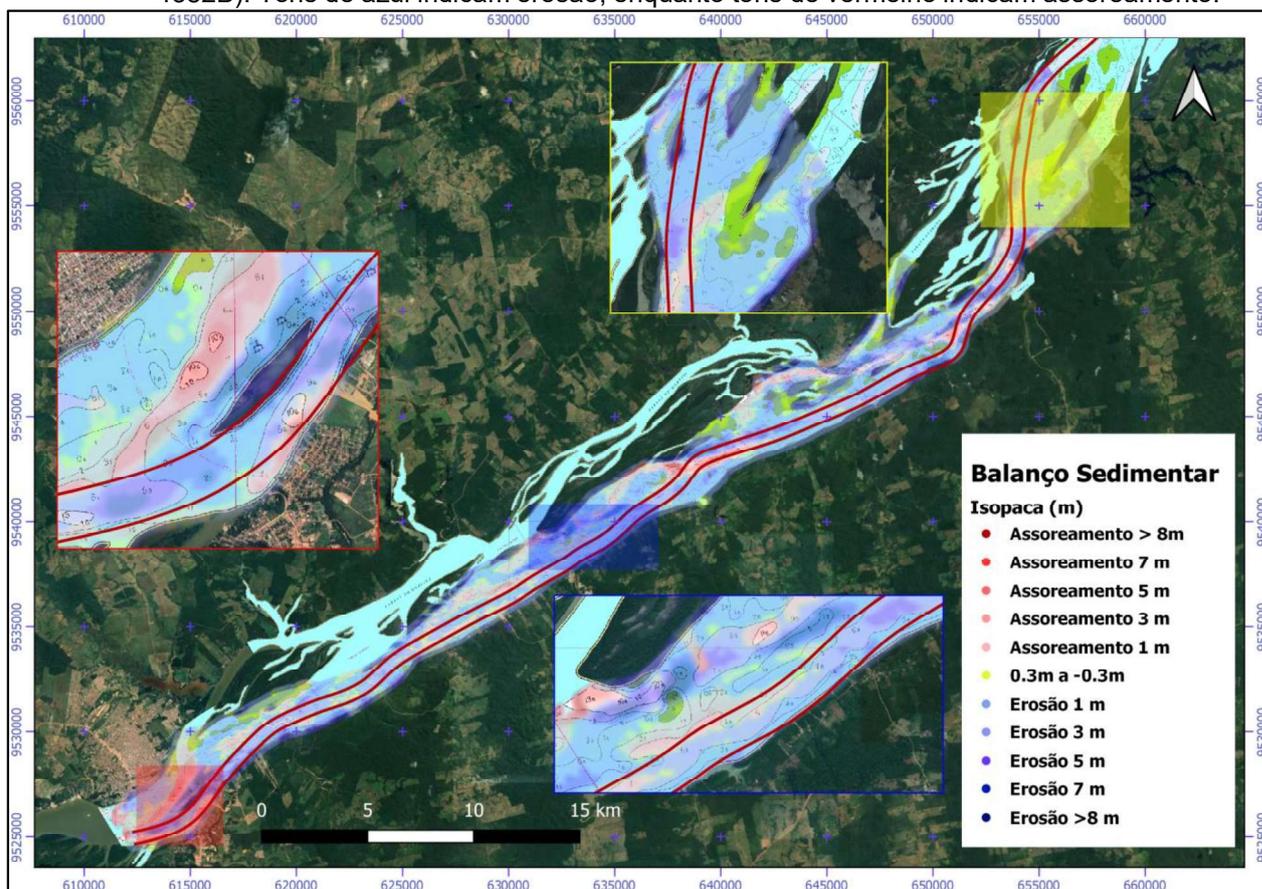
**Figura 28** – Mapa do levantamento batimétrico/2023 e Carta Náutica/1982 (CN 4382B) - Balanço sedimentar na área de estudo. Tons de azul indicam Erosão, enquanto tons de vermelho indicam Assoreamento.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

É possível observar uma variedade de zonas com distintos comportamentos, mas a maioria das áreas possui uma variação entre +3m e -3m nas profundidades, com locais mais restritos e isolados possuindo variações mais expressivas. A Figura 29, no entanto, ilustra o posicionamento dessas ocorrências de Assoreamento e Erosão relativamente à situação originalmente encontrada na Carta Náutica (4382B).

**Figura 29** – Mapa do Balanço sedimentar na área de estudo em sobreposição à Carta Náutica (CN 4382B). Tons de azul indicam erosão, enquanto tons de vermelho indicam assoreamento.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

## 6. RESULTADOS

Os resultados indicam uma dinâmica de movimentação dos bancos de areia ao longo do tempo, com padrões erosivos a montante e assoreamento a jusante. Esse comportamento indica que os bancos de areia estão se deslocando gradualmente para jusante, o que é consistente com processos hidrodinâmicos observados em rios de grande porte, como o Tapajós. Esses processos podem ser influenciados por fatores sazonais, como as variações no regime de cheias e secas, que afetam tanto a velocidade da correnteza quanto o transporte de sedimentos.

Esse deslocamento de bancos de areia é um fator crítico para a navegabilidade, pois áreas que antes ofereciam profundidade suficiente para o tráfego de embarcações podem se tornar rasas ao longo do tempo, exigindo intervenções contínuas, como dragagens. A formação de novos bancos de areia em áreas antes navegáveis também pode representar um risco significativo para a segurança da navegação, exigindo atualizações frequentes das cartas náuticas e monitoramento constante.

A metodologia empregada, utilizando o MED para amostrar pontos ao longo de linhas específicas, foi eficaz para mapear e quantificar o deslocamento dos bancos de areia. A estimativa das velocidades de migração é particularmente útil para prever futuros impactos na navegabilidade e planejar ações preventivas, como dragagem em áreas críticas. O uso de perfis comparativos ao longo de diferentes datas mostrou-se uma ferramenta valiosa para evidenciar a dinâmica de erosão e deposição de sedimentos.

### 6.1 Variações batimétrica e migração de bancos

#### 6.1.1 Movimentação do Banco de Areia na Região de Itaituba

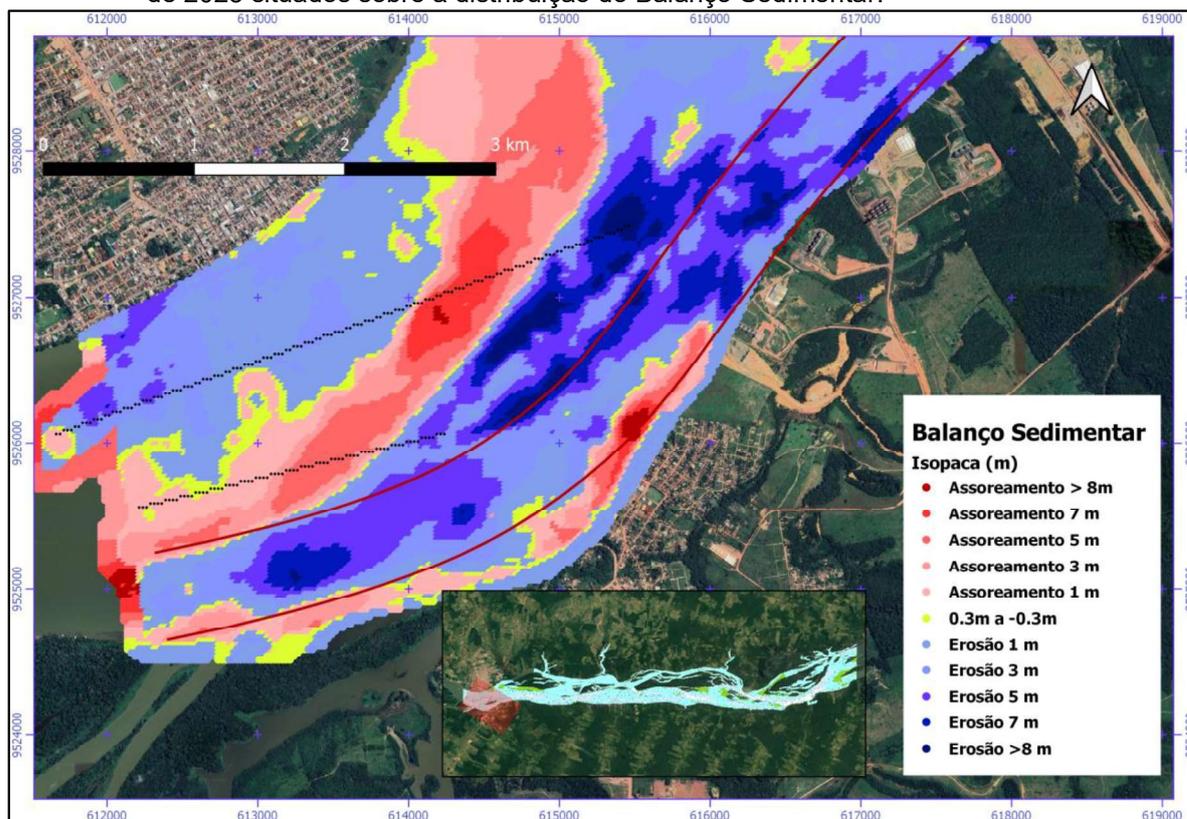
Foi identificada a movimentação de um banco de areia localizado imediatamente a montante de Itaituba, que interage diretamente com o trajeto da travessia fluvial entre Itaituba e Miritituba. Para a análise desse fenômeno, foram traçadas duas linhas de perfil longitudinal, de montante para jusante (Figura 30). As Figura 31 e 32 apresentam a migração do banco de areia ao longo do tempo, evidenciando seu deslocamento em ambas as direções.

Observou-se que o banco de areia migrou tanto em sua face de barlavento quanto na face de sotavento, nas duas seções analisadas. Esse movimento diferencial entre as faces do banco pode estar associado à influência da hidrodinâmica local

predominante, bem como às variações nas condições sedimentares ao longo do tempo. A hidrodinâmica, caracterizada por correntes fluviais de diferentes intensidades e direções, influencia diretamente a erosão e o acúmulo de sedimentos, resultando nessa migração assimétrica.

A análise detalhada das dinâmicas de migração do banco de areia é fundamental para compreender o impacto sobre a navegação na região, especialmente no que tange à segurança e à eficiência do tráfego fluvial entre Itaituba e Miritituba.

**Figura 30** – Mapa de localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382B e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.

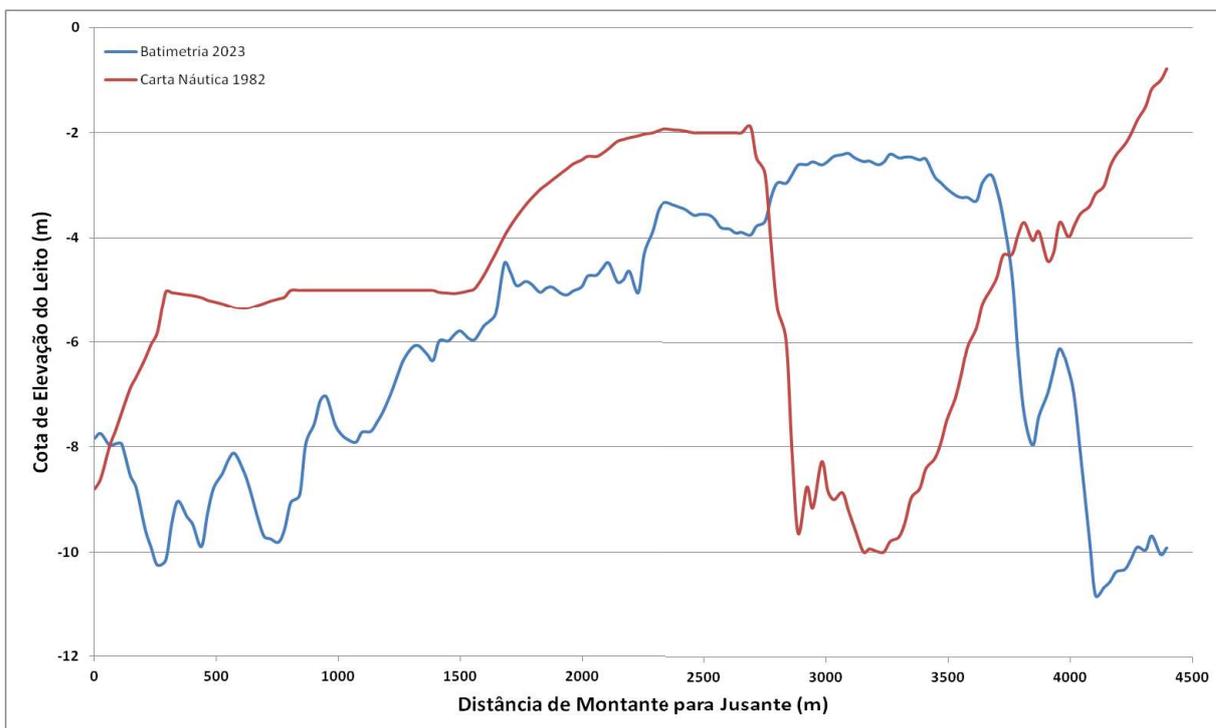


Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Tomando como referência o pico na movimentação, estima-se que o banco de areia tenha se deslocado 1.200 m em ambas as seções amostradas. Considerando o intervalo de 41 anos entre as diferentes fontes de dados, a taxa média de migração do banco de areia é calculada em cerca de 29,27 m/ano, o que corresponde a 2,44 m/mês.

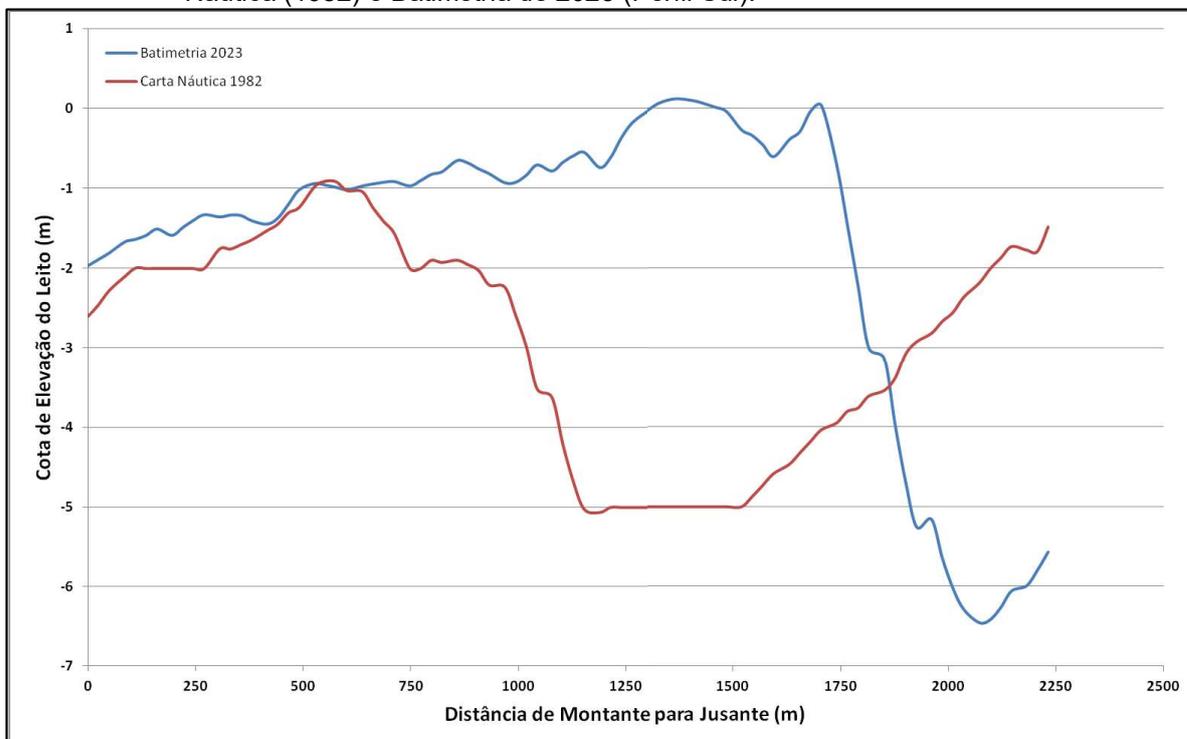
A taxa de migração oferece uma visão clara da dinâmica de movimento do banco de areia ao longo do tempo, permitindo avaliar com precisão a influência dos processos hidrodinâmicos e sedimentares em sua evolução. Essa análise é fundamental para compreender como esses fatores moldam a morfologia do banco de areia e afetam as condições de navegabilidade na região.

**Figura 31** – Superposição do Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023 (Perfil Norte).



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

**Figura 32** – Superposição Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023 (Perfil Sul).



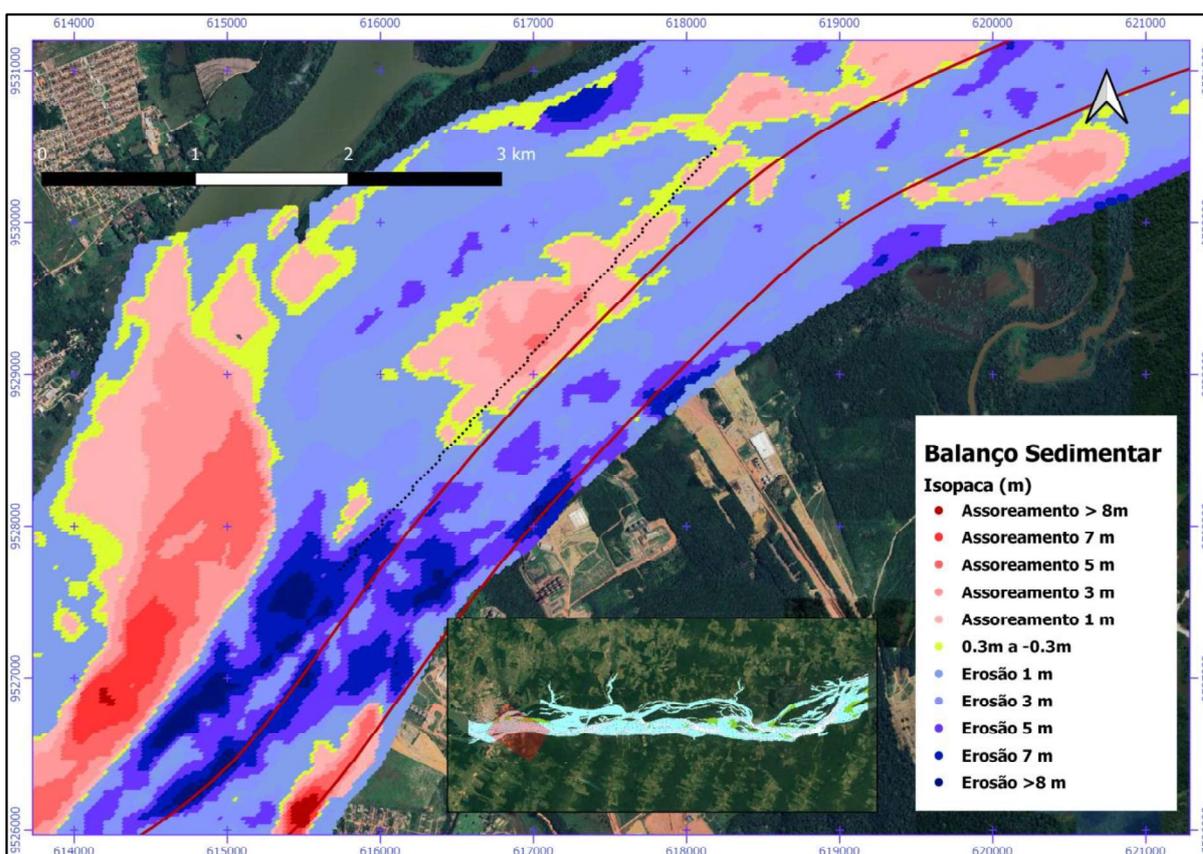
Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

### 6.1.2 Movimentação do banco de areia localizado a jusante da ilha à frente de Miritituba

Foi identificada a movimentação de um banco de areia que, originalmente, estava anexado à ilha localizada em frente a Miritituba (Figura 33). A análise do perfil (Figura 34) evidencia uma migração do banco de areia no sentido de montante para jusante.

Os dados da batimetria de 2023 revelam que o banco, que inicialmente apresentava a forma característica de um banco de areia típico, deslocou-se de maneira significativa, destacando-se da ilha à qual estava anteriormente conectado. Esse deslocamento resultou na formação de um banco arenoso independente. Essa migração pode estar associada a mudanças nos padrões hidrodinâmicos da região, sugerindo variações nas correntes fluviais ou no regime de deposição de sedimentos ao longo do tempo.

**Figura 33** – Mapa de Localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382B e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.

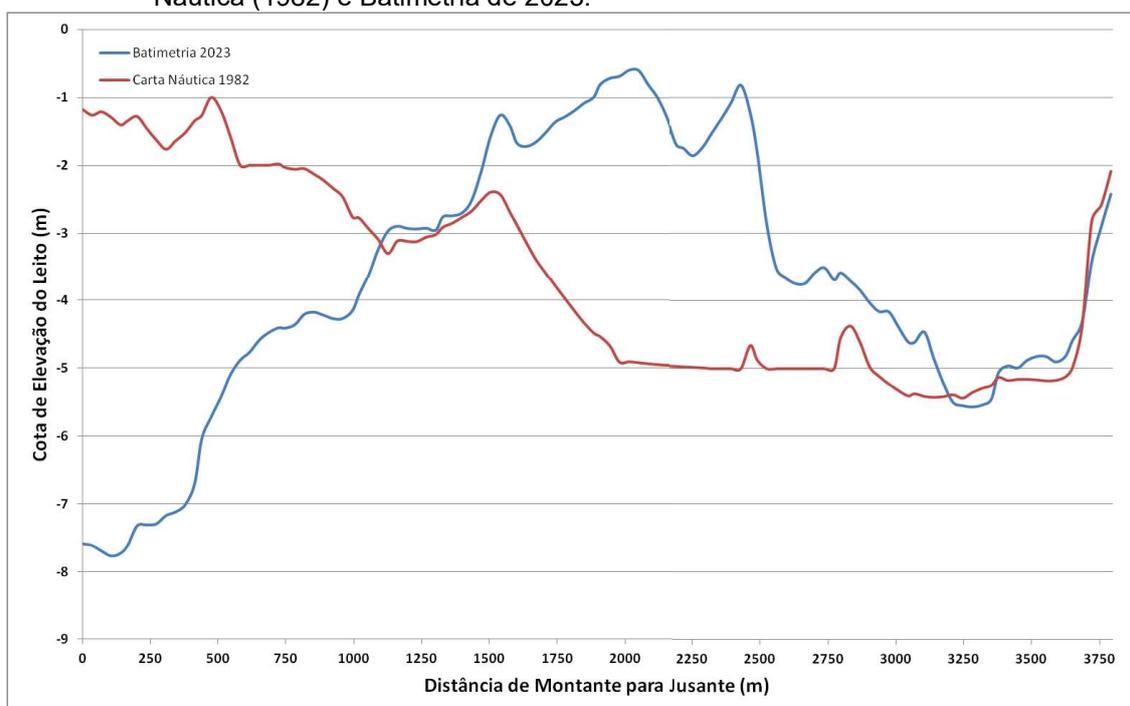


Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Adotando como referência o ponto onde o banco de areia estava anexado à ilha em 1982 e o pico da migração do banco de areia em 2023, estima-se um deslocamento de 2.000 m. Considerando o intervalo de 41 anos entre as fontes de dados, a taxa média de migração do banco de areia é calculada em cerca de 48,78 m/ano, o que corresponde a 4,06 m/mês.

Essa estimativa da velocidade de migração é obtida dividindo a distância total deslocada pelo intervalo de tempo considerado. A taxa de migração oferece uma visão quantitativa da dinâmica de deslocamento do banco de areia ao longo do tempo, refletindo a influência dos processos hidrodinâmicos e das condições sedimentares na evolução do banco arenoso.

**Figura 34** – Superposição dos Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023.



**Fonte:** Elaborado pela Autora (2023).

Para avaliar a movimentação dos bancos de areia, foram definidos 5 perfis, abrangendo 3 bancos de areia distintos e uma seção de canal. Cada perfil foi cuidadosamente selecionado para representar uma área específica do leito fluvial, permitindo uma análise detalhada das características e movimentações dos bancos de areia.

Os 3 bancos de areia e a seção de canal foram analisados separadamente, proporcionando uma descrição minuciosa e uma avaliação precisa da movimentação observada. Isso incluiu a análise da dinâmica de cada banco de areia, a identificação dos padrões de deslocamento e a investigação das influências dos processos hidrodinâmicos e sedimentares.

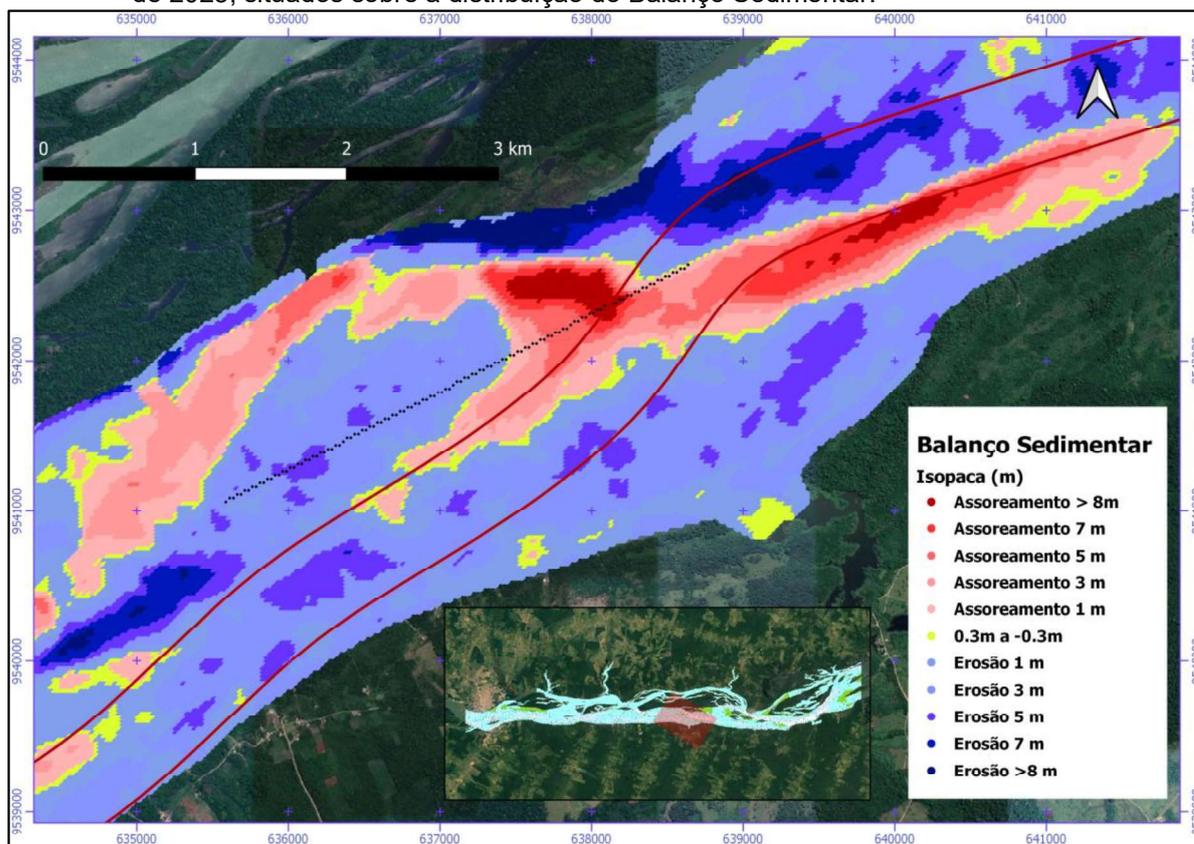
A abordagem individualizada para cada banco de areia possibilitou uma compreensão mais aprofundada das variações na movimentação e na geomorfologia do leito fluvial. Esses dados são fundamentais para a interpretação dos processos de transporte de sedimentos e para o planejamento de futuras intervenções ou monitoramentos, garantindo uma gestão mais eficaz e informada da área.

### 6.1.3 Movimentação do banco localizado a montante de Barreiras

Foi detectada a movimentação de um banco de areia situado a 10 km a montante de Barreiras. Para analisar essa movimentação, foi traçada uma linha de perfil de montante para jusante com o objetivo de caracterizar a geomorfologia do banco de areia (Figura 35). O perfil obtido (Figura 36) revela uma migração significativa da configuração do fundo fluvial no sentido de montante para jusante.

A análise dos dados mostra que o banco de areia, deslocou-se de maneira relativamente uniforme em ambas as faces: a face de barlavento (exposta ao fluxo) e a face de sotavento (protegida do fluxo). Essa movimentação homogênea pode ser interpretada como resultado dos processos hidrodinâmicos que influenciam o transporte e a redistribuição de materiais na área estudada.

**Figura 35** – Mapa de localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382B e Batimetria de 2023, situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.

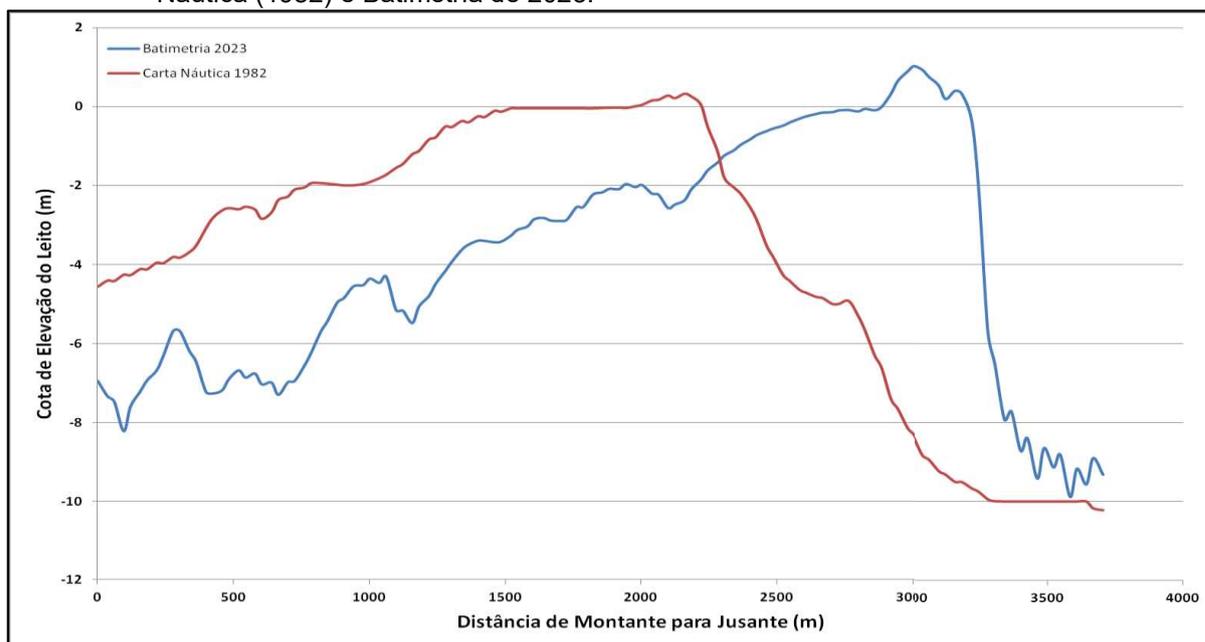


Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Tomando como referência o pico do banco de areia, estima-se que ele tenha se deslocado 1.000 m. Com base no intervalo de 41 anos, a taxa de migração foi calculada em aproximadamente 24,39 m/ano, o que equivale a 2,03 m/mês.

Essa estimativa da velocidade de migração foi obtida dividindo a distância total deslocada pelo período analisado. A taxa de migração oferece uma visão clara da dinâmica da formação sedimentar ao longo do tempo, permitindo uma análise mais detalhada dos processos de transporte e deposição de sedimentos na área de estudo. Esses dados são essenciais para compreender a estabilidade e a evolução das características do leito fluvial ao longo de períodos prolongados.

**Figura 36** – Superposição Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023.



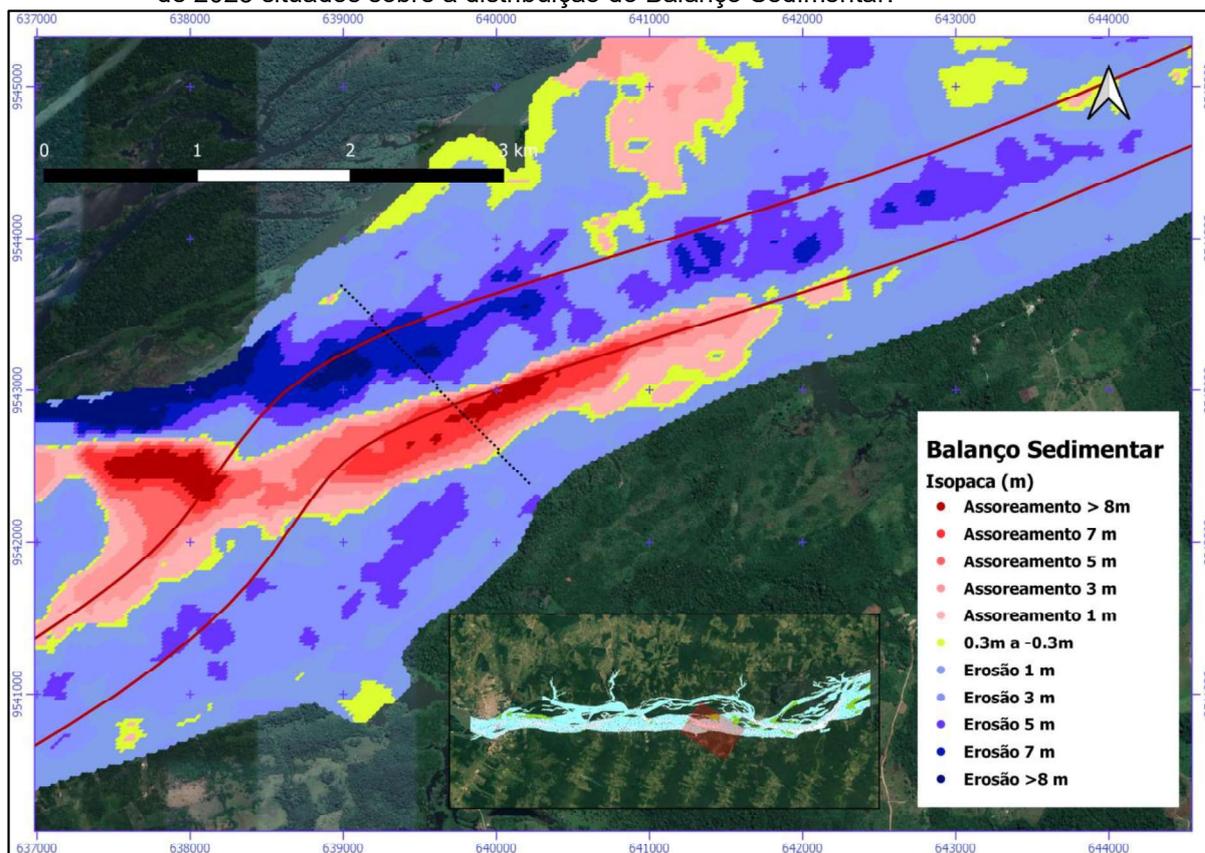
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

#### 6.1.4 Movimentação do Banco de Areia no Canal próximo a Barreiras

Foi identificada a movimentação lateral do canal natural localizado a 7 km a montante de Barreiras. Para analisar essa movimentação, foi traçada uma linha de margem a margem com o objetivo de delinear um perfil da formação (Figura 37). O perfil amostrado (Figura 38) revela uma migração lateral da formação de fundo, apesar das variações nas resoluções espaciais dos dados originais.

Observa-se que a formação apresenta um padrão de movimentação compatível com padrões meandrantes, típicos de canais fluviais em planícies. Esses movimentos meandrantes são característicos da dinâmica dos canais em regiões de baixa inclinação, onde o fluxo do rio promove a formação e migração de curvas ao longo do tempo. A análise confirma que a movimentação do canal segue os padrões esperados para rios de planície, refletindo a interação contínua entre processos hidrodinâmicos e sedimentares.

**Figura 37** – Mapa de localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382B e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.

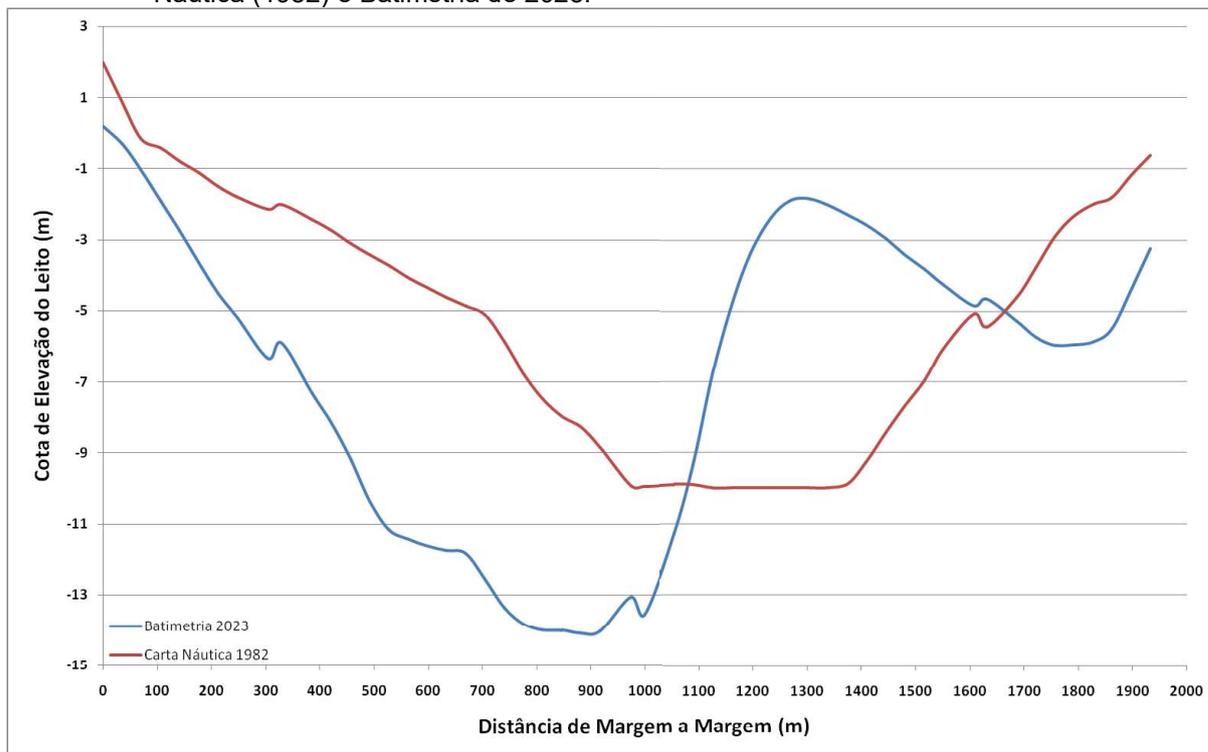


Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Com base no ponto mais profundo do canal, estima-se que a estrutura tenha sofrido um deslocamento lateral de 400 m ao longo de um intervalo de 41 anos, a taxa média de movimentação meandrante do canal é calculada em 9,76 m/ ano, o que corresponde a 0,81 m/mês.

Essa taxa de movimentação é obtida dividindo a distância total deslocada pelo intervalo de tempo considerado. A análise da velocidade de movimentação meandrante fornece uma indicação da dinâmica de migração lateral do canal ao longo do tempo, refletindo a influência dos processos hidrodinâmicos e sedimentares que contribuem para a formação e evolução dos meandros em canais de planície.

**Figura 38** – Superposição de Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023.



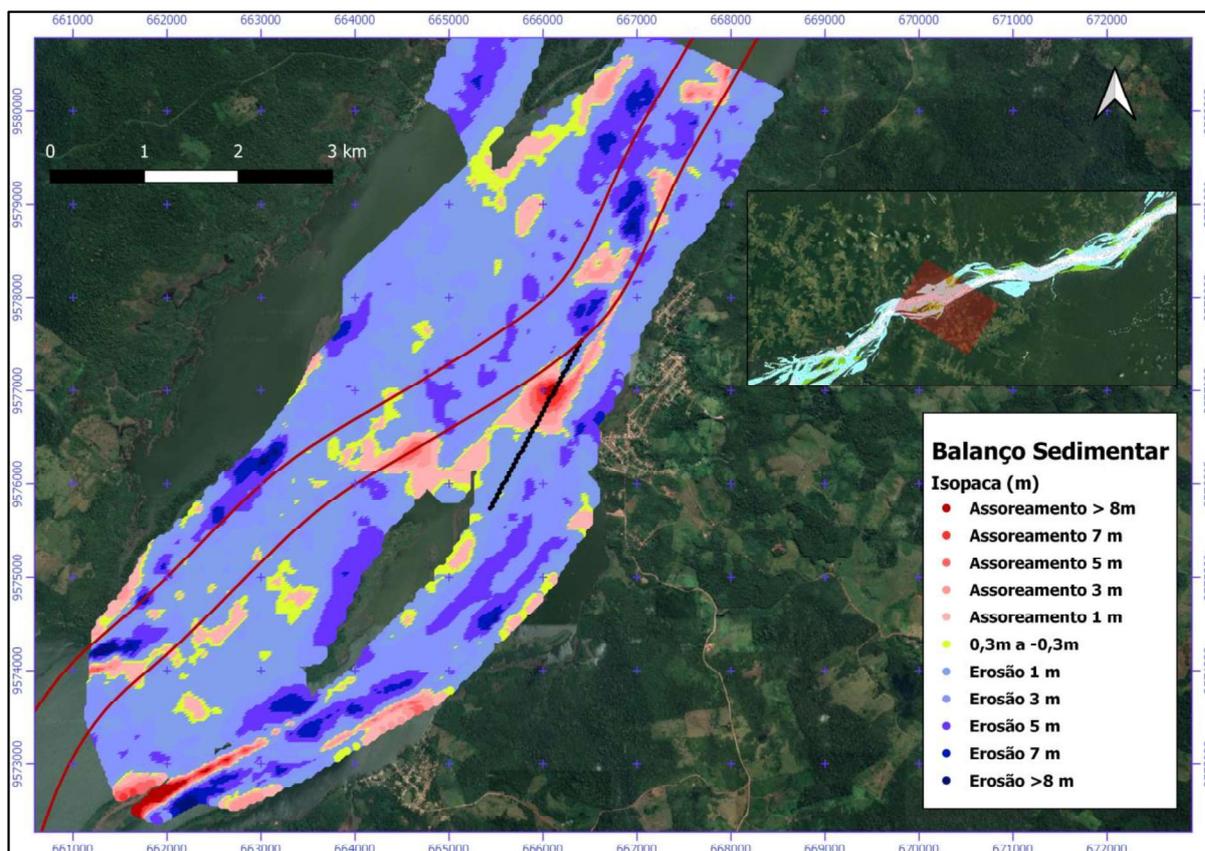
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

#### 6.1.5 Movimentação do Banco de Areia na Região Entorno de Fordlândia

Na região de Fordlândia, foi observada uma movimentação mínima no leito fluvial. No entanto, um aspecto notável é o crescimento de um banco de areia localizado a jusante da ilha do Piolho, a montante de Fordlândia (Figura 39).

O perfil analisado (Figura 40) mostra um aumento significativo desse banco de areia, indicando uma acumulação gradual de sedimentos. Esse crescimento pode estar associado a mudanças nas condições hidrodinâmicas, como variações na velocidade do fluxo da água ou na carga sedimentar transportada pelo rio.

**Figura 39** – Mapa de localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382B e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.

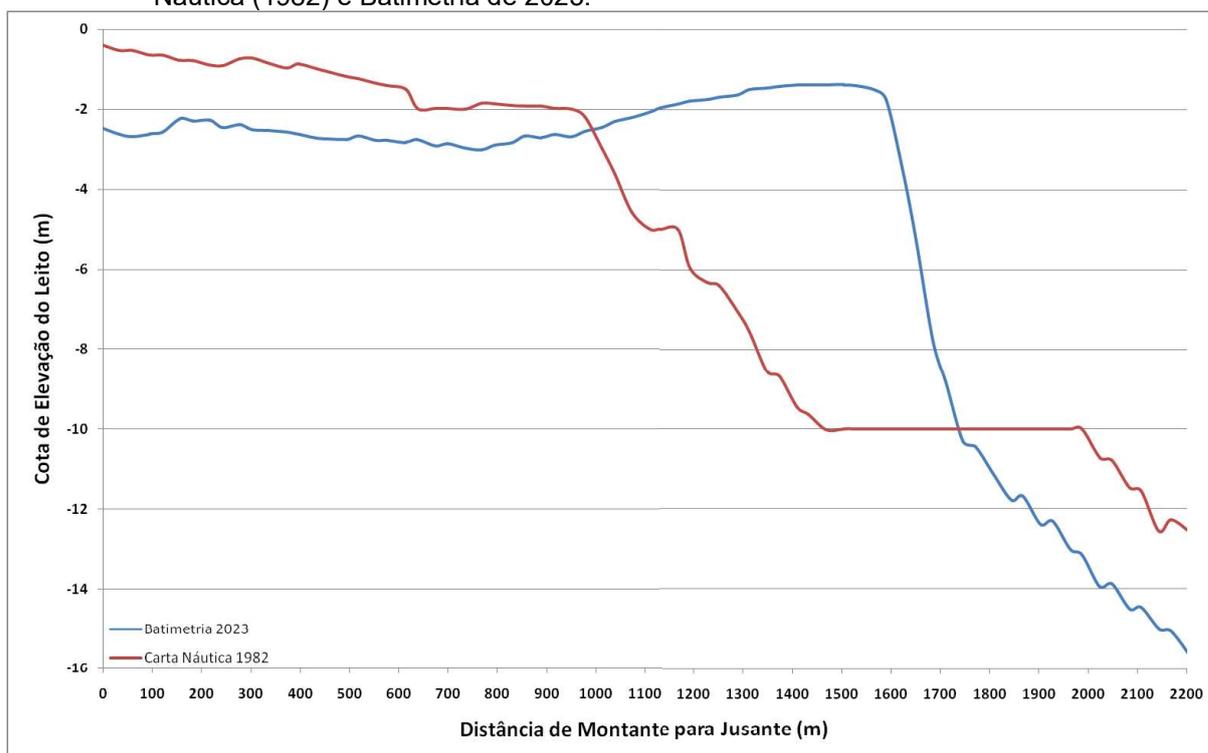


Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Com base no início da face de sotavento do banco de areia, estima-se que este tenha sofrido um crescimento significativo em direção a jusante, estendendo-se por 650 m. Considerando o intervalo de 41 anos entre os dados, a taxa média de expansão foi calculada em 15,85 m/ano, ou aproximadamente 1,32 m/mês.

É importante destacar que esse crescimento está direcionado ao canal projetado para a hidrovía, o que pode ter implicações críticas para a navegação. A expansão contínua do banco de areia pode reduzir a largura do canal navegável, gerando restrições e desafios futuros para o tráfego fluvial na região. Portanto, a monitorização constante e o uso de modelagem preditiva são essenciais para antecipar e mitigar os possíveis impactos desse fenômeno sobre a navegabilidade da hidrovía.

**Figura 40** – Superposição de Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023.



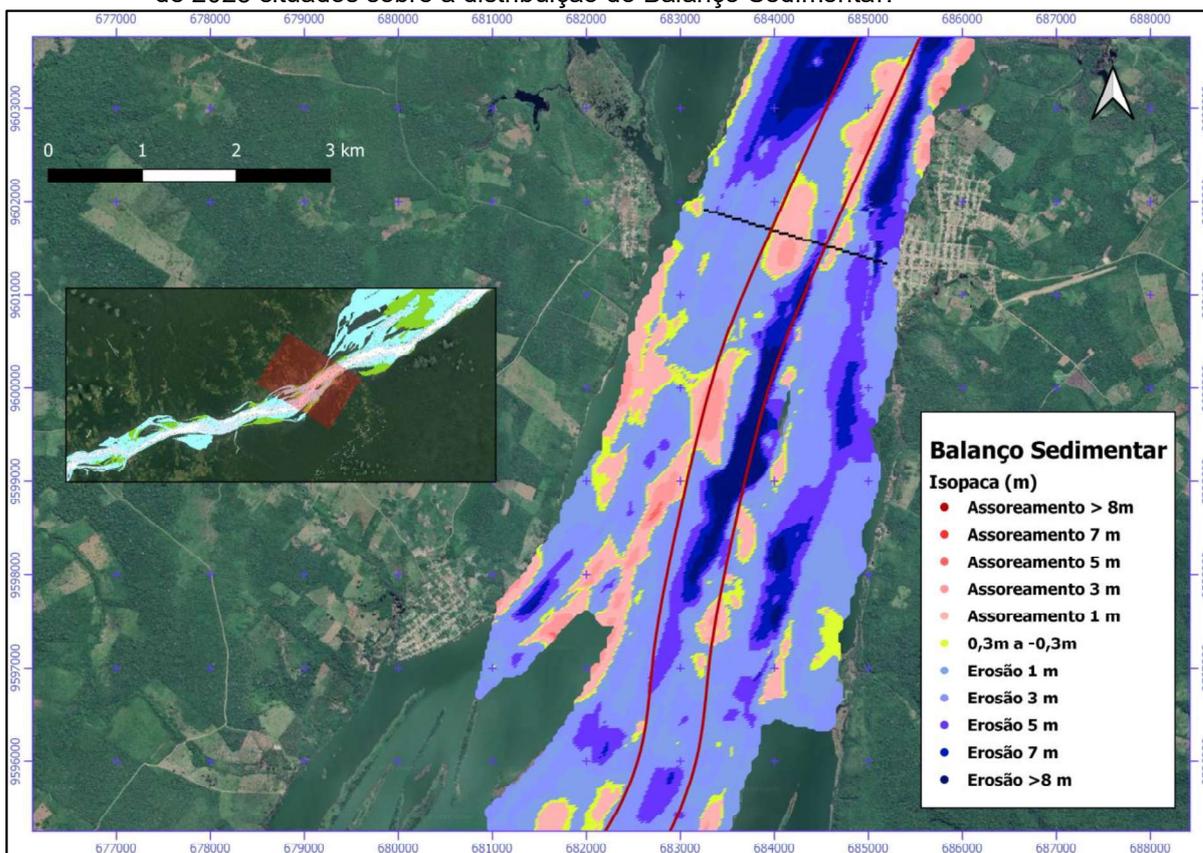
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

#### 6.1.6 Movimentação do Banco de Areia na Região Entorno de Aveiro

Na região ao redor de Aveiro, foi observada uma movimentação mínima do banco de areia de fundo. As alterações detectadas no leito fluvial foram sutis, e não indicam migrações significativas do banco de areia. Para entender melhor a geomorfologia do canal e suas possíveis variações, foi realizada uma análise com base em um perfil transversal, traçado de margem a margem, em frente a Aveiro (Figura 41).

O perfil resultante (Figura 42) demonstra uma notável estabilidade do fundo do rio. As variações identificadas ao longo do perfil parecem estar mais relacionadas às diferenças nas resoluções espaciais dos dados originais do que as mudanças reais na geomorfologia do leito fluvial. Assim, as pequenas flutuações observadas provavelmente refletem as limitações inerentes aos dados obtidos, e não alterações substanciais dos bancos de areia do leito.

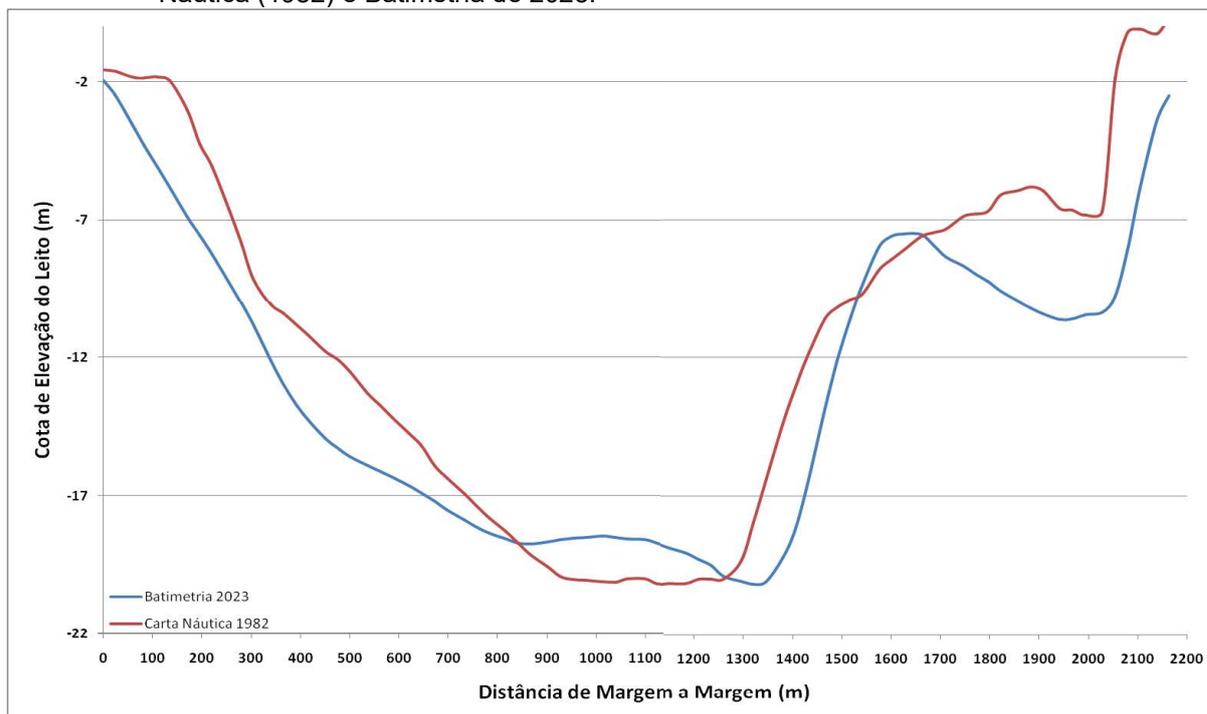
**Figura 41** – Mapa de localização dos pontos amostrados nos MED da Carta Náutica 4382A e Batimetria de 2023 situados sobre a distribuição do Balanço Sedimentar.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

A análise revelou que a região do rio em frente a Aveiro é significativamente mais estável em comparação com outras áreas avaliadas. Os perfis e as variações observadas indicam uma dinâmica reduzida do banco de areia nesta região, sugerindo que o leito fluvial em frente a Aveiro apresenta uma maior estabilidade geomorfológica. Essa estabilidade relativa pode refletir condições hidrodinâmicas e sedimentares mais constantes ou uma menor influência de processos de migração e sedimentação em comparação com outras partes do rio.

**Figura 42** – Superposição de Perfis extraídos dos Modelos de Elevação Digital gerados para a Carta Náutica (1982) e Batimetria de 2023.



**Fonte:** Elaborado pela Autora (2023).

### 6.1.7 Diagnóstico da Movimentação dos Bancos de Areia

Os resultados indicam uma dinâmica significativa na movimentação dos bancos de areia do leito do rio Tapajós. Em relação aos bancos arenosos avaliados, as velocidades de deslocamento variam de 15,85 m/ano a 48,78 m/ano, dependendo das características específicas de cada banco de areia. Essas variações refletem a influência de fatores como a intensidade do fluxo de água, a quantidade de sedimentos transportados e a configuração geomorfológica local.

No que se refere às migrações dos canais naturais, o canal avaliado apresenta uma taxa de movimentação meandrante de 9,76 m/ano. Esse movimento é típico de canais em planícies, onde os processos hidrodinâmicos favorecem a formação e a migração de meandros ao longo do tempo.

Considerando a presença de uma hidrovia ao longo da área de estudo e a proximidade dos bancos de areia avaliados das rotas de tráfego fluvial, essas informações são essenciais para o planejamento eficaz dos canais de navegação e para a programação das atividades de dragagem de manutenção. Compreender detalhadamente a dinâmica bancos de areia e as migrações dos canais permite implementar estratégias apropriadas para assegurar a navegabilidade contínua e a segurança das operações fluviais. Essa abordagem proativa ajuda a minimizar interrupções e riscos associados ao tráfego na hidrovia, promovendo uma gestão eficiente e segura do ambiente fluvial.

## **6.2 Navegabilidades na hidrovia do Tapajós no trecho Itaituba a Aveiro**

A avaliação da navegabilidade baseada nas Cartas Náuticas 4382B e 4382A, e no levantamento batimétrico de 2023 foi essencial para entender a disponibilidade de área navegável na região, onde há um fluxo intenso de embarcações e a presença de uma hidrovia ativa. Dois tipos de embarcações foram considerados: navios e barças, com calados de 9 m e 3,5 m, respectivamente. O estudo visou verificar a navegabilidade da área em diferentes níveis de rio, que variaram de 1 m a 11 m, determinando a área disponível acima das cotas mínimas necessárias para que cada tipo de embarcação pudesse navegar com segurança. O calado de 9 m foi escolhido em função do porte das embarcações observadas no Porto de Santarém, que fica adjacente a extremidade jusante da hidrovia avaliada, e julgou-se a oportunidade de considerar o uso da mesma por tais embarcações.

Para os navios, com calado de 9 m, foi fundamental analisar as restrições ao longo da rota que passa por Barcarena, Belém, Manaus, Santarém e Itaituba. Esta rota apresenta desafios para embarcações maiores devido às variações de profundidade, formações de bancos de areia e outros obstáculos naturais, que podem comprometer a segurança de navegação. A comparação entre os dados da Carta Náutica 4382B e os levantamentos batimétricos/2023 foi essencial para identificar as áreas que exigem intervenções, como dragagens, para garantir a navegabilidade dessas embarcações.

Por outro lado, as barças, com um calado menor de 3,5 m, possuem maior facilidade de navegação, especialmente em períodos de níveis mais baixos do rio. Essa disponibilidade de área navegável reduz a necessidade de manobras e desvios,

o que otimiza o transporte fluvial. A análise da navegabilidade para essas embarcações menores oferece uma visão estratégica, permitindo a utilização de diferentes tipos de embarcações conforme as condições sazonais do rio, assegurando a continuidade das operações comerciais, mesmo em períodos de restrição.

Essa abordagem foi adotada porque, na ausência de dados detalhados sobre as rotas, uma maior área navegável disponível implica uma maior flexibilidade na escolha de rotas mais diretas, com menos necessidade de contornar obstáculos ou áreas rasas. Dessa forma, assume-se que quanto maior a disponibilidade de área navegável, maior será a probabilidade de escolher rotas mais curtas e eficientes, tanto em termos de tempo quanto de economia de combustível. Utilizando ferramentas de geoprocessamento, foram selecionadas as cotas apropriadas e calculadas as áreas navegáveis para os dois tipos de levantamento, permitindo uma avaliação precisa das condições de navegabilidade na região (Tabela 1 e 2).

**Tabela 1 – Nível de rio e navegabilidade para uma embarcação com calado de 9 m**

<b>Nível do Rio (m)</b>	<b>Calado Avaliado (m)</b>	<b>Cota batimétrica acima da qual navegação é possível (m)</b>
1	9	8
2	9	7
3	9	6
4	9	5
5	9	4
6	9	3
7	9	2
8	9	1
9	9	0
10	9	-1
11	9	-2

**Fonte:** Elaborada pela Autora (2024).

**Tabela 2 –** Nível de rio e navegabilidade para uma embarcação com calado de 3 m

Nível do Rio (m)	Calado Avaliado (m)	Cota batimétrica acima da qual navegação é possível (m)
1	3	2
2	3	1
3	3	0
4	3	-1
5	3	-2
6	3	-3
7	3	-4

Fonte: Elaborada pela Autora (2024).

### 6.3 Navegabilidades na hidrovia do Tapajós

Para uma análise mais detalhada e eficaz dos dados, os resultados serão apresentados separadamente para cada um dos calados selecionados. Essa abordagem permitirá uma avaliação mais específica das características e variações associadas a cada calado, facilitando a compreensão das dinâmicas e padrões observados.

A seguir, são apresentadas as áreas correspondentes a cada metro de variação no nível do rio, relacionadas à disponibilidade de navegabilidade.

#### 6.3.1 Navegabilidade para Embarcação com Calado de 9 m

A tabela 3 oferece uma análise detalhada da influência das variações no nível do rio sobre as áreas navegáveis. Permite uma avaliação mais precisa das condições de navegação em função das flutuações do nível d'água, proporcionando insights importantes para a adequação das rotas de navegação para embarcações com calado de 9 m (selecionado em função das embarcações observadas no porto de Santarém).

**Tabela 3 – Área navegável para cada nível do rio no calado de 9 m**

Nível do Rio (m)	Área disponível em 1982 (m <sup>2</sup> )	Área disponível em 2023 (m <sup>2</sup> )
1	12.985.000 *	24.973.124 *
2	15.815.000 *	33.808.124 *
3	20.581.876 *	45.371.876 *
4	45.323.124 *	59.430.624 *
5	57.824.376 *	74.337.504 *
6	67.765.624 *	90.222.496 *
7	88.298.128 *	104.433.752
8	102.951.872	119.066.248
9	129.501.872	144.171.248
10	136.629.376	147.397.504
11	147.903.120	148.247.504

**Fonte:** Elaborada pela Autora (2024)

\*Nessas situações não há continuidade entre as áreas navegáveis de um extremo a outro da área

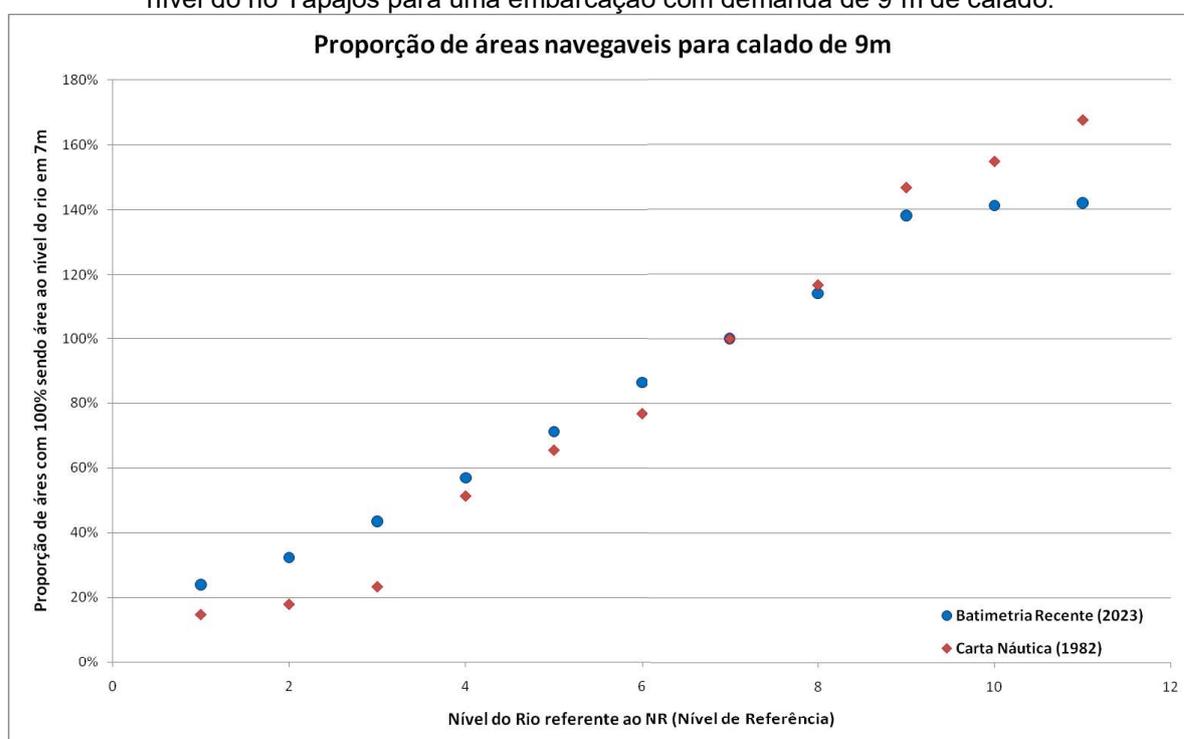
Observa-se um aumento considerável na área navegável à medida que o nível do rio sobe. A análise da Tabela 3 mostra que, em níveis inferiores a 7 m, não há continuidade nas áreas navegáveis ao longo do trajeto, o que impossibilita o trânsito contínuo de embarcações com calado de 9 m.

Em níveis de água abaixo de 7 m, as áreas navegáveis são fragmentadas e insuficientes para suportar o tráfego contínuo dessas embarcações, resultando em trechos onde a navegação é inviável. Apenas quando o nível do rio atinge 7 m ou mais, há uma área navegável contínua suficiente para permitir o tráfego dessas embarcações. A Figura 43 ilustra a proporção das áreas navegáveis em função dos níveis do rio para os conjuntos de dados de 1982 e 2023.

Baseando-se em dados históricos de níveis do rio, verifica-se que o calado de 9 m permite a navegação viável apenas durante períodos específicos do ano. Com base nas médias históricas, a navegação com embarcações desse porte é possível aproximadamente entre meados de fevereiro e junho. Durante esse período, o nível do rio é suficiente para garantir uma área navegável contínua, permitindo que as embarcações operem sem interrupções significativas.

Portanto, para embarcações com calado de 9 m, a navegação é viável por cerca de 3,5 meses ao ano, correspondendo ao período em que o nível do rio é adequado para manter áreas navegáveis contínuas e seguras.

**Figura 43** – Avaliação da proporcionalidade entre as áreas disponíveis para navegação a depender do nível do rio Tapajós para uma embarcação com demanda de 9 m de calado.



**Fonte:** Elaborado pela Autora (2024).

Analisando os conjuntos de dados de 1982 e 2023, observa-se que as proporções de áreas navegáveis em função dos níveis do rio são bastante semelhantes. Em níveis elevados do rio, a disponibilidade de áreas navegáveis é entre 40 % e 60 % superior em comparação com o nível mínimo necessário para garantir navegação contínua.

No entanto, foi identificada uma variação nas Cartas Náuticas (4382B e 4382A), que se mostra mais restritiva em níveis mais baixos e menos restritiva em níveis mais altos. Essa variação pode ser atribuída a diferenças na metodologia de coleta dos dados entre os períodos analisados. Assim, as discrepâncias observadas podem não refletir mudanças reais na geomorfologia do leito do rio, mas sim diferenças nas formas como os dados foram registrados e interpretados.

Essa consideração é crucial para interpretar corretamente os dados e para garantir que as análises reflitam a dinâmica real do leito do rio, em vez de serem influenciadas por limitações ou variações na coleta de dados.

### 6.3.2 Navegabilidade para embarcação com calado de 4 m

A Tabela 4 apresenta as áreas calculadas para cada metro de variação no nível do rio, em relação à disponibilidade de navegabilidade, com foco específico em embarcações com calado de 4 m. Esta tabela proporciona uma visão detalhada de como as flutuações no nível d'água impactam as áreas navegáveis, permitindo uma análise precisa das condições de navegação para diferentes níveis do rio.

**Tabela 4 – Áreas navegáveis para cada nível do rio no calado de 4 m**

Nível do Rio (m)	Área disponível em 1982 (m <sup>2</sup> )	Área disponível em 2023 (m <sup>2</sup> )
1	67.765.624 *	90.222.496 *
2	88.298.128 *	104.433.752
3	102.951.872	119.066.248
4	129.501.872	144.171.248
5	136.629.376	147.397.504
6	147.903.120	148.247.504

**Fonte:** Elaborada pela autora, 2024

\* Nessas situações não há continuidade entre as áreas navegáveis de um extremo a outro da área

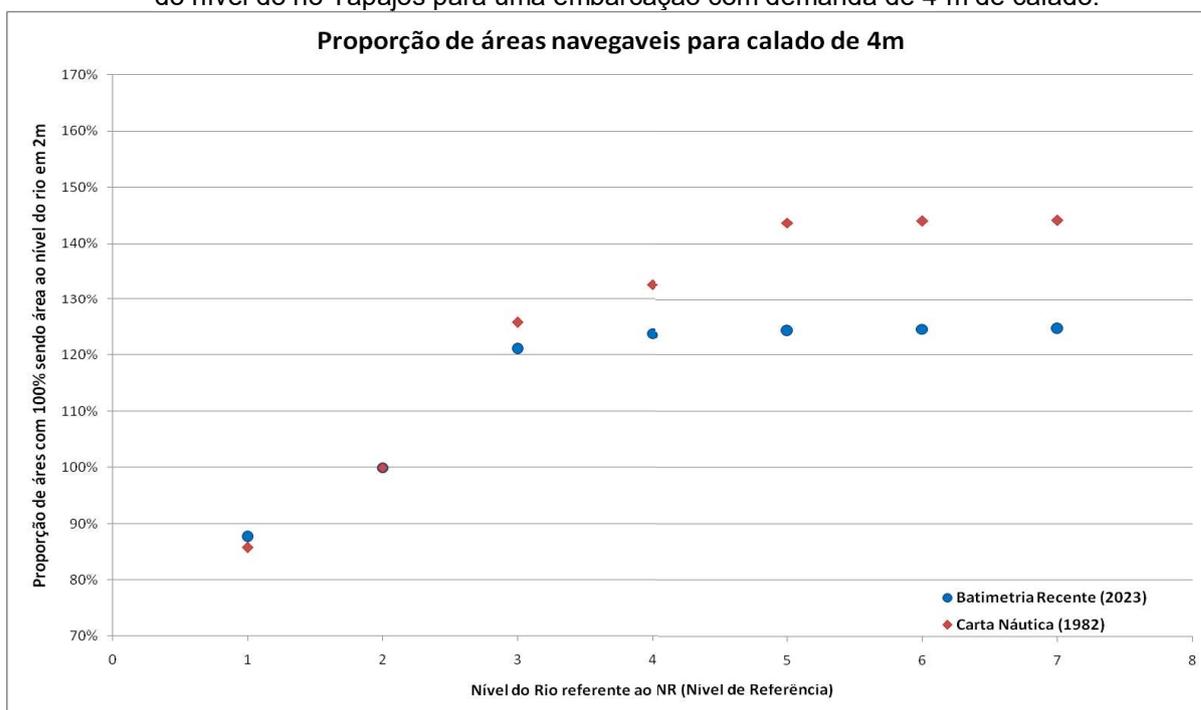
A análise dos dados mostra um incremento significativo na área navegável à medida que o nível do rio aumenta. Em níveis abaixo de 2 m, que indicam condições de seca ou extrema seca, a continuidade das áreas navegáveis é interrompida, dificultando o trânsito de embarcações do porte avaliado ao longo do trajeto.

Com base nas médias históricas, embarcações com calado de 4 m podem operar durante o ano, mas enfrentam restrições, especialmente nos meses de outubro e novembro, que são críticos devido à estação seca. Essa situação ressalta a importância de considerar os padrões climáticos e as variações sazonais na navegação fluvial.

Adicionalmente, é relevante mencionar que, em decorrência das mudanças climáticas globais, os períodos de seca têm se tornado mais prolongados e intensos. Isso pode estender as restrições de navegação, potencialmente além dos dois meses que indicam as médias históricas.

Usando o nível de 2 m como referência, onde a área navegável é considerada 100%, é possível estimar a viabilidade proporcional de navegação para diferentes níveis do rio. A Figura 44 ilustra essa proporcionalidade das áreas navegáveis para cada nível do rio, com base nos dados coletados em 1982 e 2023.

**Figura 44** – Avaliação da proporcionalidade entre as áreas disponíveis para navegação a depender do nível do rio Tapajós para uma embarcação com demanda de 4 m de calado.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Os dados demonstram que, tanto em 1982 quanto em 2023, as proporções das áreas navegáveis em relação aos níveis do rio são bastante semelhantes. Quando o nível do rio está elevado, a área navegável disponível pode ser de 40% a 60% maior do que a área mínima necessária para garantir uma navegação contínua. Isso indica que, em níveis altos, há uma margem considerável de espaço adicional para navegação.

No entanto, quando a área navegável não é contínua, a redução na área disponível para embarcações com calado de 4 m é significativa, atingindo cerca de 77% em relação ao nível de referência. Esta perda de área navegável pode comprometer a capacidade de navegação contínua e exigir ajustes nas rotas e nas operações de navegação.

Adicionalmente, observa-se uma diferença na Carta Náutica: ela tende a ser mais restritiva em níveis baixos e menos restritiva em níveis altos. Esta discrepância pode ser atribuída a diferenças na coleta e processamento dos dados, em vez de a mudanças reais na morfologia do leito do rio. Portanto, as variações observadas são mais prováveis de refletir as técnicas de coleta de dados do que alterações efetivas na estrutura do leito fluvial.

### 6.3.3 Navegabilidade para embarcação com calado de 3 m

A Tabela 5 apresenta as áreas calculadas para cada metro de variação no nível do rio, relacionadas à disponibilidade de navegabilidade. Esta tabela fornece uma visão detalhada de como as variações no nível d'água afetam as áreas navegáveis, possibilitando uma análise precisa das condições de navegação para diferentes níveis do rio.

**Tabela 5 – Área navegável para cada nível do rio no calado de 3 m**

Nível do Rio (m)	Área disponível em 1982 (m <sup>2</sup> )	Área disponível em 2023 (m <sup>2</sup> )
1	88.298.128 *	104.433.752
2	102.951.872	119.066.248
3	129.501.872	144.171.248
4	136.629.376	147.397.504
5	147.903.120	148.247.504
6	148.277.767	148.623.023
7	148.369.173	148.714.642

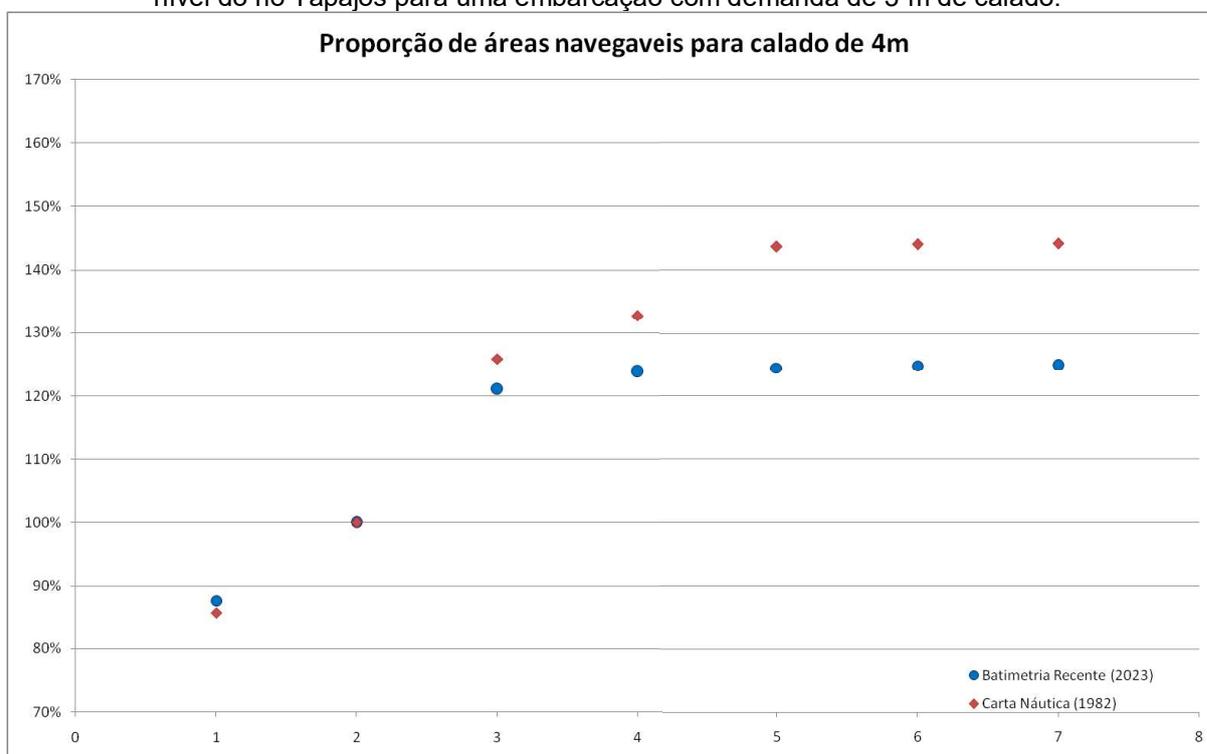
**Fonte:** Elaborada pela Autora (2024)

\* Nessas situações não há continuidade entre as áreas navegáveis de um extremo a outro da área.

Observa-se um incremento significativo na área navegável com o aumento do nível do rio. Em níveis abaixo de 1 m (situação de seca ou extrema seca), a continuidade das áreas navegáveis é interrompida, impedindo que embarcações com calado de 3 m completem o trajeto. Baseando-se nas médias históricas, embarcações desse porte conseguiriam transitar pelo trecho avaliado ao longo do ano, embora possam enfrentar restrições, especialmente nos meses de outubro e novembro, durante a estação seca.

É importante observar que as mudanças climáticas globais têm contribuído para períodos de seca mais longos e intensos. Isso pode levar a uma extensão da restrição de navegação para além dos dois meses indicados pela média histórica. Utilizando o nível de 2 m como referência (onde a área navegável é de 100%), é possível estimar a viabilidade proporcional de navegação para diferentes níveis do rio. A Figura 45 ilustra a proporcionalidade das áreas navegáveis para cada nível do rio, com base nos dados de 1982 e 2023.

**Figura 45** – Avaliação da proporcionalidade entre as áreas disponíveis para navegação a depender do nível do rio Tapajós para uma embarcação com demanda de 3 m de calado.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Os dados mostram que as proporções de áreas navegáveis em função dos níveis do rio são bastante consistentes entre 1982 e 2023. Em níveis mais elevados, a área navegável disponível pode ser de 25% a 50% maior em comparação com o nível mínimo necessário para garantir uma navegação contínua. Por outro lado, quando a área navegável não é contínua, a redução na área disponível para embarcações com calado de 3 m pode chegar a cerca de 85% em relação ao nível de referência.

Além disso, observa-se uma diferença nas Cartas Náuticas (4382B e 4382<sup>a</sup>): ela tende a ser mais restritiva em níveis baixos e menos restritiva em níveis altos. Essa discrepância pode ser atribuída às metodologias de coleta e processamento dos dados, e não necessariamente a alterações reais na morfologia do leito do rio. Assim, as variações observadas nas cartas náuticas podem refletir mais as técnicas de coleta e processamento dos dados do que mudanças efetivas no leito fluvial.

#### **6.4 Diagnósticos da navegabilidade**

Os resultados indicam que, para embarcações com menor calado, a navegação no rio não apresenta restrições significativas na maioria dos níveis de água. Contudo, para garantir a continuidade da navegação durante períodos de seca, são necessárias intervenções, como operações de dragagem, para manter as cotas navegáveis adequadas.

Para embarcações de maior calado, o nível do rio pode representar um obstáculo significativo. A criação de uma hidrovia capaz de suportar o tráfego dessas embarcações enfrenta desafios substanciais. A extensão e o volume de dragagem necessários podem tornar essas intervenções inviáveis do ponto de vista técnico e econômico. Além disso, a dragagem em larga escala pode ter impactos ambientais significativos, alterando a dinâmica natural do rio e afetando o ecossistema local.

As áreas navegáveis para diferentes calados e níveis do rio demonstram a importância de considerar as flutuações sazonais e as variações nos dados históricos para o planejamento da navegação. A expansão e a redução das áreas navegáveis em função do nível do rio influenciam diretamente a viabilidade e a segurança das operações de navegação.

As mudanças climáticas e as variações nas cartas náuticas devem ser monitoradas continuamente. O aumento da intensidade e duração das secas pode estender as restrições de navegação além dos períodos históricos observados. Incorporar essas informações na gestão da hidrovia é essencial para garantir a continuidade e a segurança da navegação ao longo do ano.

Para assegurar uma navegação eficaz e segura, é fundamental adaptar as intervenções às condições reais do rio e considerar os impactos ambientais associados. O planejamento da hidrovia deve levar em conta as variações sazonais, climáticas e as características específicas dos dados náuticos, garantindo que as estratégias de dragagem e manutenção sejam apropriadas e sustentáveis.

#### 6.4.1 Impacto das Dimensões dos Canais na Manutenção e Navegabilidade

A análise dos volumes de dragagem revela diferenças significativas dependendo da largura do canal e da presença de tolerância na sua profundidade. Canais mais largos, como o de 4 m, necessitam de volumes maiores de dragagem devido à maior quantidade de sedimentos acumulados, o que pode resultar em custos mais elevados e maior frequência de manutenção. Esse aumento no volume de dragagem implica uma estratégia mais intensiva e dispendiosa para a gestão do canal.

Por outro lado, canais mais estreitos, como o de 3 m, apresentam volumes menores de sedimentos a serem removidos, mas esses volumes ainda são significativos. A necessidade de monitoramento e manutenção contínuos permanece alta, dado que a menor largura pode intensificar desafios relacionados à sedimentação e formação de bancos de areia.

A análise sugere que a largura do canal e as tolerâncias na profundidade influenciam diretamente a quantidade de sedimentos a ser removida e, portanto, a estratégia de manutenção necessária. Canais mais estreitos podem exigir abordagens diferentes para a gestão de sedimentação, uma vez que a acumulação de sedimentos pode ocorrer mais rapidamente e de forma mais concentrada, gerando a necessidade de intervenções mais frequentes para garantir a navegabilidade.

Portanto, o planejamento eficaz das atividades de dragagem e manutenção é fundamental, pois afeta tanto os custos associados quanto a frequência das intervenções necessárias para manter a navegabilidade e a segurança do canal.

## 6.5 Impacto Econômico da Seca na Hidrovia do Tapajós

### 6.5.1 Impacto das Dimensões dos Canais na Manutenção e Navegabilidade

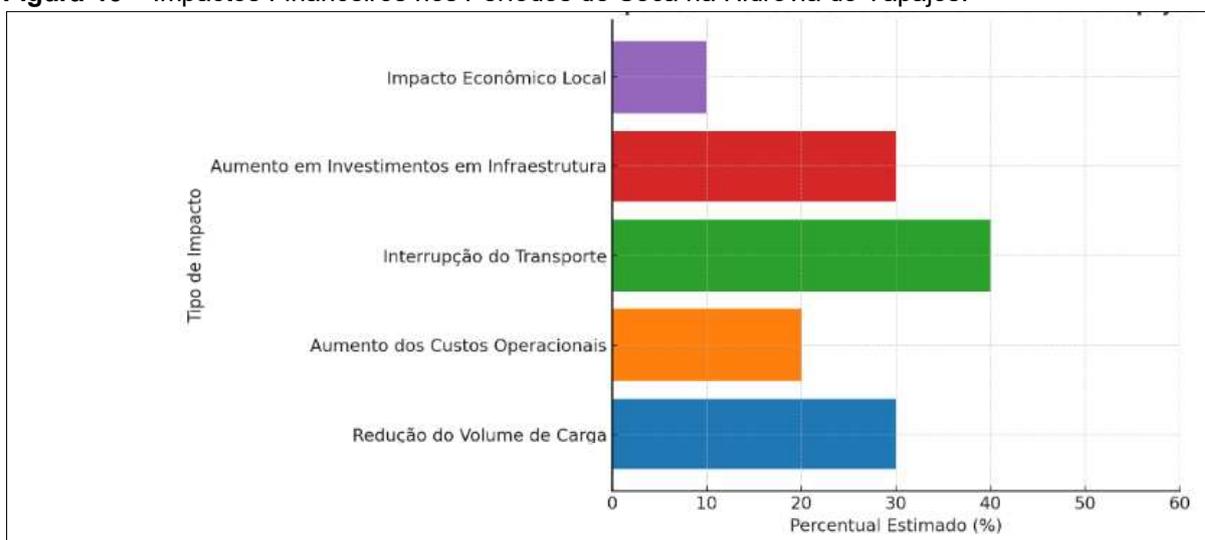
Os impactos financeiros da seca na hidrovia do Tapajós são multifacetados e variam conforme vários fatores, como volume de carga, profundidade do rio, custos operacionais e condições econômicas locais. De acordo com a ANTAQ (2020), a capacidade de carga das embarcações pode ser significativamente reduzida durante períodos de seca, o que afeta diretamente a receita do transporte fluvial.

Os custos operacionais geralmente aumentam durante a seca devido ao maior consumo de combustível, manobras mais complexas e a necessidade de manutenção adicional, com a dragagem sendo um gasto particularmente elevado. A redução da navegabilidade pode limitar o volume de mercadorias transportadas, o que impacta negativamente o comércio regional.

Além disso, os investimentos em dragagem e manutenção podem crescer substancialmente, dependendo da extensão das intervenções necessárias para manter a navegabilidade. Este aumento nos custos pode, por sua vez, elevar o custo de vida local (Figura 46), devido à redução da oferta e ao aumento dos preços dos produtos.

Esses impactos variam de acordo com as condições específicas e a intensidade da seca, tornando essencial a realização de estudos detalhados para uma análise mais precisa das consequências econômicas.

**Figura 46** – Impactos Financeiros nos Períodos de Seca na Hidrovia do Tapajós.



**Fonte:** Elaborado pela Autora (2024).

## 7. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos evidenciam uma dinâmica significativa na migração dos bancos de areia ao longo do Rio Tapajós, com variações nas taxas de migração conforme a localização e as condições hidrodinâmicas.

A análise das taxas de migração revela diferenças marcantes entre as localidades estudadas. Em Itaituba, a taxa média de migração é de aproximadamente 29,27m/ano, indicando uma dinâmica moderada. Isso pode refletir uma menor influência das forças hidrodinâmicas ou uma configuração geomorfológica que reduz a mobilidade dos bancos de areia. Em contraste, em Miritituba, o banco localizado a jusante da ilha apresenta uma taxa significativamente maior, de cerca de 48,78 metros por ano. Este comportamento pode ser atribuído a uma combinação de fatores, como maior velocidade do fluxo e maior quantidade de sedimentos transportados, que favorecem a mobilidade da estrutura sedimentar.

A movimentação lateral do canal em Barreiras é observada com uma taxa de 9,76 m/ano, um padrão típico de canais fluviais em planícies. O fluxo do rio promove a formação e migração de meandros ao longo do tempo, e a movimentação meandrante é crucial para entender a estabilidade e evolução dos canais fluviais, influenciando diretamente a navegabilidade e a necessidade de dragagem.

Em Fordlândia, foi observada uma expansão significativa de um banco de areia, com uma taxa média de crescimento de cerca de 15,85 m/ano. Esse crescimento pode estar relacionado a mudanças nas condições hidrodinâmicas, como variações na velocidade do fluxo ou na quantidade de sedimentos transportados. A proximidade do banco de areia com a hidrovia projetada pode impactar a navegabilidade, especialmente se o crescimento continuar a reduzir a largura do canal navegável.

Por outro lado, a região de Aveiro mostra grande estabilidade das características do fundo, com variações mínimas observadas. Esse comportamento sugere condições hidrodinâmicas mais constantes ou menor influência de processos sedimentares. A estabilidade relativa observada em Aveiro é um fator positivo para a navegação, indicando menos necessidade de intervenções frequentes.

Os dados sobre a navegabilidade para embarcações com calado de 9 metros e 4 m mostram que para embarcações com calado de 9 metros, a navegação é viável apenas durante um período limitado do ano, destacando a importância de considerar as flutuações sazonais do nível do rio no planejamento das operações fluviais. Para embarcações com calado de 4 m, as áreas navegáveis são mais amplas e disponíveis por uma maior parte do ano, indicando maior flexibilidade na navegação para embarcações menores. No entanto, é essencial monitorar continuamente as condições do leito do rio e as variações no nível da água para garantir a segurança e a eficácia das operações de navegação.

A análise dos dados batimétricos e das taxas de migração das características sedimentares fornece uma compreensão detalhada da dinâmica do leito do Rio Tapajós. As variações nas taxas de migração e nas áreas navegáveis refletem a complexidade dos processos hidrodinâmicos e sedimentares na região. É evidente a necessidade de monitoramento contínuo e intervenções planejadas para manter a navegabilidade e garantir a segurança das operações fluviais.

## 8. CONCLUSÕES

Este estudo sobre a dinâmica dos bancos de areia e a navegabilidade da Hidrovia do Tapajós, entre Itaituba e Aveiro/Pará, revela a complexidade e a variabilidade dos processos hidrológicos e sedimentares que impactam a região. Os resultados obtidos demonstram que a migração dos bancos de areia apresenta taxas significativas, variando entre 16 m e 48 m por ano, influenciadas por fatores como a localização e as condições hidrodinâmicas. Em Itaituba, a migração é moderada, enquanto em Miritituba, a elevada taxa de migração ressalta a necessidade de intervenções frequentes para assegurar a navegabilidade.

A estabilidade geomorfológica observada na região de Aveiro, em contraste com a dinâmica ativa de áreas como Miritituba e Barreiras, enfatiza a importância de um planejamento estratégico adaptativo. Este planejamento deve considerar as variações sazonais e os efeitos das secas extremas, que impactam a navegabilidade das embarcações. As embarcações de grande calado (9 m) enfrentam restrições significativas, enquanto as de menor calado (3 m e 4 m) oferecem maior flexibilidade operacional, embora também estejam sujeitas às mudanças nas condições do leito do rio.

A aplicação da técnica de Krigagem permitiu a identificação de áreas críticas para o acúmulo de sedimentos e a formação de bancos de areia, fornecendo subsídios essenciais para a elaboração de estratégias de manutenção e gestão de riscos. Este estudo destaca a urgência de um monitoramento contínuo das condições fluviais e sedimentares, bem como a necessidade de campanhas regulares de levantamento batimétrico para garantir a segurança e a eficácia das operações fluviais.

Em suma, este trabalho não apenas enriquece a compreensão da dinâmica dos bancos de areia na Hidrovia do Tapajós, mas também sublinha a necessidade de uma abordagem proativa na gestão da navegabilidade. As recomendações para futuras pesquisas devem se concentrar em modelagens preditivas e na análise de intervenções que possam otimizar a segurança e a eficiência das operações na hidrovia. A interligação entre as práticas de gestão hídrica e o monitoramento contínuo é crucial para a sustentabilidade da navegação fluvial na região, assegurando a vitalidade econômica e a segurança das comunidades ribeirinhas.

## 9. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para aprimorar a compreensão e a gestão da dinâmica do leito do Rio Tapajós e otimizar a navegabilidade, é essencial realizar análises periódicas e contínuas da geomorfologia do leito do rio. Essas análises permitirão monitorar mudanças ao longo do tempo e fornecerão uma compreensão mais detalhada da dinâmica de sedimentação e migração dos bancos de areia, além de possibilitar a adaptação das estratégias de gestão conforme necessário.

Também é importante investigar de forma mais aprofundada a hidrodinâmica que influencia a migração dos bancos de areia. A modelagem hidrodinâmica pode contribuir a prever futuras alterações na morfologia do leito e auxiliar na elaboração de estratégias para mitigar impactos, proporcionando um planejamento mais preciso e eficaz.

Além disso, explorar os impactos ambientais e ecológicos associados às mudanças na geomorfologia do leito do rio é fundamental. Avaliar como a migração dos bancos de areia e a alteração dos canais influenciam a fauna aquática e os ecossistemas locais contribuirá para uma gestão sustentável da hidrovia e promoverá a proteção dos recursos naturais.

Incluir variáveis climáticas, como precipitação, temperatura e eventos extremos, nas análises é necessário para entender como as mudanças climáticas podem afetar a dinâmica do leito do rio e a navegabilidade. Esses dados ajudarão a antecipar e adaptar-se a possíveis mudanças futuras, assegurando uma gestão proativa e adaptativa.

Desenvolver e testar modelos preditivos para avaliar futuras mudanças na morfologia do leito com base em diferentes cenários hidrodinâmicos e climáticos também é uma recomendação importante. Esses modelos permitirão prever e mitigar problemas antes que eles impactem significativamente a navegação e o meio ambiente, oferecendo uma visão mais clara das possíveis direções futuras.

A promoção de colaborações com especialistas em áreas como geologia, ecologia e engenharia civil permitirá uma abordagem mais abrangente na análise e no gerenciamento das dinâmicas fluviais. Essas colaborações podem trazer novas perspectivas e soluções integradas para os desafios enfrentados.

É fundamental também atualizar as Cartas Náuticas, já que as existentes datam de 1982. A atualização dessas cartas é essencial para refletir com precisão as condições atuais do leito do rio e assegurar que as informações estejam alinhadas com a dinâmica recente, facilitando a navegação segura e eficiente.

Desenvolver um plano de gestão e monitoramento contínuo das áreas navegáveis, incluindo a implementação de tecnologias para o monitoramento em tempo real, facilitará a tomada de decisões rápidas e eficazes para garantir a segurança da navegação e a proteção ambiental. Esse planejamento proativo é fundamental para enfrentar os desafios e adaptar-se às mudanças dinâmicas do rio.

Por fim, envolver a comunidade local e os usuários do rio no processo de pesquisa e gestão é indispensável. O conhecimento tradicional e a experiência local podem oferecer insights valiosos e auxiliar na implementação de soluções práticas e aceitas pela comunidade, promovendo uma gestão mais participativa e eficaz.

Essas recomendações visam melhorar a eficiência da manutenção dos canais, garantir a segurança da navegação e promover a sustentabilidade ambiental no trecho do Rio Tapajós. A implementação dessas sugestões pode contribuir significativamente para a otimização da navegabilidade e a gestão dos recursos hídricos na região, equilibrando desenvolvimento e conservação ambiental.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAQ. Agência Nacional de Transportes Aquaviários (Brasil): VEN 2020 **Vias Economicamente Navegadas**. Brasília, 2021.

BARBOSA, J. A.; LIMA, T. S.; ROCHA, M. P. A relação entre bancos de areia e qualidade da água: Investigação da capacidade de retenção de poluentes e nutrientes em rios. **Revista de Ecologia e Recursos Hídricos**, v. 15, n. 4, p. 201–215, 2022.

BRUNCKHORST, André. **Relação entre as atividades de mineração e a saúde de recém-nascidos na bacia hidrográfica do Rio Tapajós**. 2022. 79 f., il. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Disponível em: <http://www.rlbea.unb.br/jspui/handle/10482/45395>. Acesso em: 27 fev. 2024.

COSTA, M. R.; ALMEIDA, T. L. Geomorfologia fluvial e a dinâmica dos bancos de areia no Rio Amazonas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, p. 429–442, 2018.

CRESSIE, N. The origins of Kriging. **Mathematical Geology**, n. 3, p. 239–252, 1990.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Relatório de Monitoramento Hidrossedimentológico da Hidrovia do Rio Tapajós**. Brasília: DNIT, 2020.

DIAS, A. B.; SOUZA, M. L. Dinâmica hidrossedimentar e formação de bancos de areia em um trecho do Rio Tapajós. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, p. 47–59, 2020.

FEARNSIDE, P. M. (2006). **Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle**. Estudos Avançados, v. 20, n. 57, p. 157-166, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000300018>.

FERREIRA, R. S.; MARTINS, L. P.; GOMES, T. A. A relação entre a variação da carga de sedimentos suspensos e a formação de bancos de areia em rios. **Revista de Geomorfologia e Sedimentologia**, v. 22, n. 4, p. 250–267, 2020.

FIGUEIREDO, Nélio Moura de. **Modelo de gerenciamento de usos múltiplos da água: um estudo de caso para a bacia hidrográfica do rio Tapajós**. Orientador: Cláudio José Cavalcante Blanco. 2016. 304 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8255>. Acesso em: 28 fev. 2024.

FREITAS, M. B. Banco de areia como unidade geomorfológica ativa em canal sinuoso: estudo de caso no Rio Xingu, Pará, Brasil. **Boletim de Geografia**, p. 25–43, 2017.

**Geologia e Solos da Amazônia Brasileira**. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2020.

GONÇALVES, I.; FERNANDES, R. J. A. R.; LEÃO, J. Análise da evolução temporal dos bancos de areia do rio Parnaíba na zona urbana de Teresina-PI com o uso de

imagens de satélite. Em: **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. p 1, 2017. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP022816.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2024.

GOZZI, PRISCILA VALÉRIA TAVARES. **Mineralogia e geoquímica dos sedimentos de fundo do rio-lago Tapajós-Pa**. Orientador: Marcondes Lima da Costa. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11722> . Acesso em: 27 fev. 2024.

GUIMARÃES, J. R.; SOUZA FILHO, E. Dinâmica dos bancos de areia e sua influência na navegabilidade dos rios. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, p. 23–34, 2005a.

GUIMARÃES, L. A.; SOUZA FILHO, C. R. Dinâmica dos bancos de areia no rio Tapajós: implicações para a navegabilidade. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 2, p. 135–147, 2005b.

ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining Geostatistics**. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1978.

JUNK, W. J. et al. **The Central Amazon Floodplain: Ecological Dynamics, Ecosystem Services, and Sustainable Management**. [s.l.] Springer, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0157-1>.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. The influence of human activity on the sediment dynamics of the Amazon River. **Geophysical Research Letters**, v. 17, 2005a.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. A dinâmica dos rios e suas implicações para a gestão de recursos hídricos na Amazônia. **Revista de Gestão de Recursos Hídricos**, p. 105–120, 2005b.

LE MOS, EDIVALDO JUNIOR DE SOUZA. **Aspectos de qualidade, balneabilidade e trofia das águas de praias da margem direita do Baixo Rio Tapajós**. Orientador: José Reinaldo Peleja. 2019. 57f. Dissertação (Mestrado em Recursos Aquáticos Continentais Amazônicos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Aquáticos Continentais Amazônicos. Universidade Federal do Oeste do Pará, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufopa.edu.br/jspui/handle/123456789/196> . Acesso em: 27 fev. 2024.

LIMA, A. C.; COSTA, J. A. **Geologia e Solos da Amazônia: Características e Uso**. Manaus: Editora do INPA, 2019.

LIMA, A. M. **Dinâmica e evolução dos bancos de areia no trecho entre as cidades de Itaituba e Santarém, Pará**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

LIMA, J. P.; FERREIRA, T. R.; SILVA, A. M. A influência da vazão e da hidrodinâmica fluvial na distribuição e geomorfologia dos bancos de areia. **Revista Brasileira de Hidrologia**, v. 10, n. 1, p. 45–60, 2021.

MACHADO, A. L. *et al.* Influência dos processos de formação e evolução de bancos de areia na geomorfologia fluvial do Rio Tapajós. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 95-111, 2022.

MAPBIOMAS. **Relatório Anual de Monitoramento da Cobertura e Uso do Solo no Brasil**, 2017. Disponível em: <https://www.mapbiomas.org/relatorio-anual-2017>.

MARENGO, J. A. On the hydrological cycle of the Amazon Basin: A historical review and current state-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 1-19, 2006.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.

MCTI. **Geologia e Solos da Amazônia Brasileira**. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2020.

MEDEIROS, R. P.; LOPES, J. E. **Estudo sobre a navegabilidade na Hidrovia do Rio Tapajós**: Implicações ambientais e econômicas. Relatório Técnico. Instituto de Hidrologia Amazônica, 2013.

MELO, P. F.; SANTOS, J. F. Morphodynamics of large river sandbars and river engineering: A case study of the Amazon River, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 95, p. 102442, 2019.

MOLINIER, M.; GUYOT, J. L.; DE OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. **Hydrological Sciences Journal**, v. 41, n. 3, p. 345-376, 1996.

MOTA, J. A. F.; SILVA, E. M. S.; MARTINELLI, L. A. Dinâmica hidrossedimentar e banco de areia no rio Tapajós, Alter do Chão, Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 402-413, 2019.

NOVAES, E. L.; SANTOS, C. F.; REIS, R. E. Formação e evolução de bancos de areia fluviais na bacia do rio Xingu, estado do Pará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 185-196, 2017.

OLIVEIRA, D. R.; COSTA, M. A.; FERREIRA, T. N. Impactos das barragens na dinâmica dos bancos de areia em rios: Uma análise hidrodinâmica. **Revista de Hidrologia e Recursos Hídricos**, 14(3), 150-165, 2018.

OLIVEIRA, F. G.; SANTOS, L. M.; ALMEIDA, R. T. Interação entre bancos de areia e processos sedimentares: A influência da hidrodinâmica fluvial. **Revista de Geomorfologia e Recursos Hídricos**, 10(2), 85-99, 2017.

OLIVEIRA, Fernando Abreu. **Quantificação de microcistinas em águas do Rio Tapajós, Amazônia, Brasil. Orientadora: Dávia Marciana Talgatti.** 36 f., il. Dissertação (Mestrado em Biociências) – Programa de Pós-Graduação em Biociências, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufopa.edu.br/jspui/handle/123456789/712> . Acesso em: 28 fev. 2024.

OLIVEIRA, R. M. **Dinâmica dos bancos de areia no rio Tapajós no trecho entre as cidades de Itaituba e Santarém (PA).** Rio de Janeiro. Anais: ABRAG, 2017. v. 15

PEREIRA, M. A.; SOUZA, L. F. *Caracterização geomorfológica dos bancos de areia em trechos fluviais: Tamanho, forma e distribuição espacial.* **Revista de Geociências Fluviais**, 15(2), 120-135, 2019.

PETRY, P.; BAYLEY, P. B.; MARKLE, D. F. Relationships between fish assemblages, macrophytes and environmental gradients in the Amazon River floodplain. **Journal of Fish Biology**, v. 63, sA, p. 547-579, 2003.

RADEMANN, LUCAS KREIN et al. Avaliação da dinâmica de bancos de areia com imagens de alta resolução no rio areal do limeira, sul do brasil. **RAEGA-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 57, p. 3-22, 2023. Disponível em: <https://ojs.homologa.ufpr.br/raega/article/view/87358>. Acesso em: 27 fev. 2024.

ROCHA, B. C. et al. **Tapajós sob o Sol: Mergulho nas características ecológicas, socioculturais e econômicas da bacia hidrográfica.** 1. ed. Brasília: International Rivers, 2022. v. 1, 119 p.

SAACKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics.** New York: Oxford University Press, 1989.

SALATI, E.; VOSE, P. B. **Amazon Basin: A system in equilibrium.** Science, v. 225, n. 4658, p. 129-138, 1984.

SALOMÃO, B.H.N.; DA MOTA, A.E.A.S.; MELO, A.C.S. Panorama dos projetos de infraestrutura hidroviária: um levantamento bibliográfico de projetos na hidrovía juruena-teles pires-tapajós. **Normalização e Revisão**, p. 78, 2021. Disponível em: [https://paginas.uepa.br/eduepa/wpcontent/uploads/2022/01/logistica\\_amazonia\\_v2.pdf#page=78](https://paginas.uepa.br/eduepa/wpcontent/uploads/2022/01/logistica_amazonia_v2.pdf#page=78). Acesso em: 27 fev. 2024.

SANTOS, A. R.; FERREIRA, F. D. Caracterização e classificação dos solos em áreas de várzea do Rio Tapajós. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1-12, 2017. DOI:10.1590/18069657rbcS20160240.

SANTOS, CLEBER et al. Regionalização Hidroclimatológica da bacia hidrográfica do rio Tapajós. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 9, n. 1, p. 32-51, 2015. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org>. Acesso em: 28 fev. 2024.

SANTOS, P. R.; ALMEIDA, C. S.; RIBEIRO, F. J. A diversidade biológica e os processos ecológicos associados aos bancos de areia em rios. **Revista Brasileira de Ecologia Aquática**, 18(2), 95-112, 2021.

SANTOS, V. C. DOS; BLANCO, C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. DE. Distribution of rainfall probability in the Tapajos River Basin, Amazonia, Brazil. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 14, n. 3, p. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2284>. Acesso em: 28 fev. 2024.

SANTOS, R. F.; COSTA, A. B.; FERREIRA, L. M. A relação entre bancos de areia e conectividade fluvial: impactos na dispersão de sedimentos e na diversidade de habitats. **Revista Brasileira de Ecologia Fluvial**, v. 8, n. 3, p. 145-159, 2022.

SILVA, A. B.; SOUZA, C. D. **Dinâmicas ambientais e navegação sustentável na Hidrovia do Rio Tapajós**, 2021.

SILVA, E. C. R. et al. Modelagem hidrodinâmica como ferramenta de apoio à gestão hídrica do rio tapajós. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s. l.], v. 22, n. 2, 2021. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbq/article/view/1975> . Acesso em: 28 fev. 2024.

SILVA, GREICY KELLY DA *et al.* Estudo da evolução temporal dos bancos de areia no leito do Rio Choró, Ceará, Brasil. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XXIII.**, 24 a 28 nov. 2019 , Foz do Iguaçu – PR, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/54529> . Acesso em: 27 fev. 2024.

SILVA, J. D.; SOUZA, R. A. Dinâmica de Sedimentação e Tipos de Solos na Bacia do Rio Tapajós. **Geografia e Desenvolvimento**, v. 12, n. 2, p. 15-29, 2021.

SILVA, J. P. Precipitação e padrões climáticos na bacia hidrográfica tropical: Análise de dados e tendências. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 34(4), 225-240, 2020.

SILVA, J. P. G.; DANTAS, M. E. H.; SANTOS, S. P. Hidrodinâmica e morfologia dos bancos de areia no trecho entre Itaituba e Santarém (PA). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 122-136, 2022.

SILVA, J. P.; SOUZA, A. M. A variação dos tipos de solo e sua influência na navegabilidade e na sustentabilidade dos recursos naturais na Hidrovia do Rio Tapajós. **Revista Brasileira de Geografia**, 40(1), 55-70, 2021.

SILVA, R. T.; ALMEIDA, P. J.; OLIVEIRA, G. M.; COSTA, L. S. A influência dos bancos de areia na hidrodinâmica e nos processos biogeoquímicos dos sistemas fluviais. **Revista de Ecologia Fluvial**, 34(2), 145-160, 2022.

SILVA, Sâmea Cibele Freitas Da Silva. **Variação espaço-temporal de cianobactérias no Baixo Rio Tapajós, Pará, Brasil**. Orientador: Sérgio Melo. 2020. 96 f. Tese (Doutorado em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento) - Programa de Pós-graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, Universidade Federal do Oeste do Pará, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufopa.edu.br/jspui/handle/123456789/347>. Acesso em: 28 fev. 2024.

SOUSA, Eduarda Silva de. **Influência de fenômenos climáticos sobre o regime de vazões na bacia hidrográfica do rio Tapajós**. Orientadora: Vanessa Conceição dos Santos. 2023. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2023. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/6531> . Acesso em: 28 fev. 2024.

SOUZA, E. C. de; TAVARES, A. Impactos da navegação na qualidade dos solos ao longo do Rio Tapajós. **Revista de Geociências**, v. 24, n. 3, p. 35-50, 2022.

SOUZA, Renata Silva et al. **Aporte de carbono orgânico em diferentes períodos hidrológicos no rio Tapajós (PA), Amazônia, Brasil**. Geosciences= Geociências, v. 38, n. 1, p. 221-228, 2019. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/13298>. Acesso em: 28 fev. 2024.

TOMASELLA, J.; PINHO, P. F.; BORMA, L. S.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. The droughts of 1997 and 2005 in Amazonia: Floodplain hydrology and its ecological implications. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 2, 024040, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024040>.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2008.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. 2. ed. Nashville, TN, USA: John Wiley & Sons, 2007.