

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Integração de Dados LiDAR e Batimétricos na Modelagem Hidrológica: Estudo
de Caso - Rio Piranhas-Açu**

Victória Gibrim Teixeira
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

VICTÓRIA GIBRIM TEIXEIRA

Integração de Dados LiDAR e Batimétricos na Modelagem Hidrológica: Estudo de Caso - Rio Piranhas-Açu

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

Orientador: Italo Oliveira Ferreira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

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

T

T266i
2025
Teixeira, Victória Gibrim, 2025-
Integração de dados LiDAR e batimétricos na modelagem
hidrológica: estudo de caso - Rio Piranhas-Açu / Victória Gibrim
Teixeira. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (62 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexos.

Inclui apêndices.

Orientador: Ítalo Oliveira Ferreira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2025.

Referências bibliográficas: f. 58-60.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.378>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Levantamentos hidrográficos - Piranhas-Açu, Rio (PB e
RN). 2. Levantamentos hidrográficos - Métodos de simulação.
3. Dados geoespaciais. 4. Mapas batimétricos. I. Ferreira, Ítalo
Oliveira, 1988-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 526.99

VICTÓRIA GIBRIM TEIXEIRA

Integração de Dados LiDAR e Batimétricos na Modelagem Hidrológica: Estudo de Caso - Rio Piranhas-Açu

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

APROVADA: 28 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

Victória Gibrim Teixeira
Autora

Italo Oliveira Ferreira
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 18/06/2025 às 09:48:15 e pelo orientador em 18/06/2025 às 10:11:52. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **W71V.SNZZ.BVQ2** e clique no botão 'Validar documento'.

À minha madrinha, que me ensinou a contar nos dedos.
Ao meu pai, que me ensinou a fazer contas de cabeça.
À minha avó, que me ensinou a contar com Deus.
À minha família e amigos, que são com quem eu conto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ser minha fortaleza, por me conceder serenidade e força para trilhar este caminho e por ter planos muito maiores que os meus.

À minha família, por reforçar o meu potencial e o meu lugar no mundo, e especialmente à minha avó Elisa, cujos sonhos de me ver crescer e prosperar me guiaram nessa jornada. Sou grata por tê-la perto de mim, por me apoiar, me incentivar e me amparar incondicionalmente.

Ao prof. Italo, meu orientador, afillhado e amigo, por acreditar no meu potencial, incentivar minha jornada acadêmica, me proporcionar oportunidades que transformaram minha vida e por sua paciência e generosidade ao compartilhar conhecimentos e me ajudar a evoluir.

Ao GPHIDRO, por ser meu lugar na UFV há tanto tempo. Me esforço diariamente para ver esse grupo crescer cada vez mais. Tenho orgulho de fazer parte de uma iniciativa tão importante para a Hidrografia no Brasil.

Aos amigos de longa data e aos conquistados no meio do caminho, por tornarem essa jornada mais leve com parceria e apoio.

Ao meu pai que, sem dúvidas, seria a pessoa mais feliz e orgulhosa com essa conquista. Se um dia eu conseguir ser ao menos metade da pessoa que ele foi, estarei no caminho certo.

À minha madrinha, que se despediu de mim no início desta jornada, na minha primeira semana de aulas no Mestrado. Sou quem sou hoje por seu amor, sua criação e seu cuidado. Serei eternamente grata por fazer parte da família que ela escolheu.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação, e ao Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), pelo financiamento do projeto que originou esta pesquisa.

Por fim, agradeço às pessoas que conheci em Açu (RN). Lá testemunhei desafios enfrentados por comunidades que têm seus sonhos adiados pela falta de água. Que esse documento seja uma forma de amplificar essas histórias.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“Nunca perca de vista o seu ponto de partida”.
(Santa Clara de Assis)

RESUMO

TEIXEIRA, Victória Gibrim, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Integração de Dados LiDAR e Batimétricos na Modelagem Hidrológica: Estudo de Caso - Rio Piranhas-Açu.** Orientador: Italo Oliveira Ferreira.

A modelagem hidrológica é fundamental para a gestão eficiente dos recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas, onde a disponibilidade de água é limitada e a variabilidade climática impacta diretamente a segurança hídrica. No Brasil, o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF) representa uma das principais iniciativas para garantir o abastecimento hídrico no Nordeste, demandando estudos detalhados para otimizar a distribuição da água. Neste contexto, a presente pesquisa avaliou a integração de dados LiDAR aerotransportados e batimetria monofeixe na modelagem hidrológica do rio Piranhas-Açu, trecho essencial para a transposição hídrica entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. A coleta de dados envolveu a definição de uma rede geodésica, com a utilização de estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e de marcos geodésicos previamente existentes. O levantamento aerofotogramétrico e LiDAR cobriu uma área superior a 290 km², com resolução espacial de 10 cm, enquanto a batimetria foi realizada ao longo do canal fluvial por meio de 500 seções transversais espaçadas a cada 500 metros. A combinação desses dados possibilitou a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta precisão que, em seguida, foram incorporados à modelagem hidrológica no software HEC-RAS, permitindo a simulações hidrodinâmicas diante da liberação da vazão máxima operacional do PISF. Dessa forma, este estudo reforça a importância da escolha adequada da base cartográfica para modelagens hidrológicas e contribui para o aprimoramento da gestão hídrica em regiões semiáridas, fornecendo subsídios técnicos para o planejamento de medidas mitigadoras e intervenções estruturais. Como recomendação, sugere-se a realização de novos estudos que avaliem diferentes estratégias de liberação da vazão do PISF, visando reduzir perdas por evaporação e minimizar os impactos operacionais sobre infraestruturas existentes.

Palavras-chave: Base cartográfica; Dados geoespaciais; Simulações hidrológicas

ABSTRACT

TEIXEIRA, Victória Gibrim, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Integration of LiDAR and Bathymetric Data in Hydrological Modeling: Case Study - Piranhas-Açu River.** Adviser: Italo Oliveira Ferreira.

Hydrological modeling is essential for the efficient management of water resources, especially in semiarid regions, where water availability is limited and climate variability directly impacts water security. In Brazil, the São Francisco River Integration Project with the Northern Northeast Basins (PISF) represents one of the main initiatives to ensure water supply in the Northeast, requiring detailed studies to optimize water distribution. In this context, this research evaluated the integration of airborne LiDAR data and single-beam bathymetry in the hydrological modeling of the Piranhas-Açu River, an essential stretch for water transposition between the states of Paraíba and Rio Grande do Norte. Data collection involved the definition of a geodetic network, using stations from the Brazilian Continuous Monitoring Network (RBMC) and previously existing geodetic landmarks. The aerial photogrammetric and LiDAR survey covered an area of over 290 km², with a spatial resolution of 10 cm, while bathymetry was performed along the river channel using 500 cross sections spaced every 500 meters. The combination of these data allowed the generation of high-precision Digital Terrain Models (DTMs) that were then incorporated into the hydrological modeling in the HEC-RAS software, allowing hydrodynamic simulations in the event of the release of the maximum operational flow of the PISF. Thus, this study reinforces the importance of choosing the appropriate cartographic basis for hydrological modeling and contributes to the improvement of water management in semiarid regions, providing technical support for the planning of mitigating measures and structural interventions. As a recommendation, it is suggested that new studies be carried out to evaluate different strategies for releasing the PISF flow, aiming to reduce evaporation losses and minimize operational impacts on existing infrastructures.

Keywords: Cartographic framework; Geospatial data; Hydrological simulations

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bacia Hidrográfica Piranhas-Açu.....	26
Figura 2 - Eixos do PISF e Rio Piranhas-Açu.....	26
Figura 3 – Divisão dos trechos da área de estudo	27
Figura 4 – Representação esquemática da metodologia	29
Figura 5 – Plano de voo	32
Figura 6 – Planejamento da campanha batimétrica	33
Gráfico 1 – Vazão média mensal de longo prazo relacionadas às estações fluviométricas	36
Gráfico 2 – Média mensal do volume útil dos reservatórios (2008 – 2021)	36
Figura 7 – Estações de referência da rede ativa.....	42
Figura 8 – Pontos de apoio	43
Figura 9 – Estações de referência da rede passiva	44
Figura 10 – Vértices reocupados do apoio básico.....	45
Figura 11 – Modelo geoidal.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estações fluviométricas selecionadas para estudo das vazões	35
Tabela 2 – Coordenadas das estações de referência da rede ativa	41
Tabela 3 – Coordenadas dos pontos de apoio	42
Tabela 4 – Coordenadas das estações de referência da rede passiva	43
Tabela 5 – Coordenadas dos vértices reocupados do apoio básico	44
Tabela 6 – Coordenadas dos marcos existentes	45
Tabela 7 – Vértices de referência utilizados para confecção do modelo geoidal local	47
Tabela 8 – Vértices de referência utilizados para aferição do modelo geoidal local.	49
Tabela 9 – Vazões resultantes	51
Tabela 10 - Declividade média dos trechos pertencentes à calha do Piranhas-Açu.	52
Tabela 11 - Coeficiente de rugosidade de Manning de acordo com as condições ambientais da calha do Piranhas-açu	52
Tabela 12 - Diferença de nível entre os resultados do modelo e o registro de campo nas estações	53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA - Agência Nacional de Águas

BHPA - Bacia Hidrográfica Piranhas-Açu

CE - Ceará

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

DPIVAS - Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado Várzeas de Souza

GNSS - *Global Navigation Satellite System*

HEC-RAS - *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IMU - *Inertial Measurement Unit*

LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LiDAR - *Light Detection and Ranging*

MB - Marinha do Brasil

MBES - *Multibeam Echo Sounders*

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDT - Modelo Digital de Terreno

MGL - Modelo Geoidal Local

MIDR - Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional

MMQ - Método dos Mínimos Quadrados

PA – Ponto de Apoio

PB - Paraíba

PE - Pernambuco

PISF - Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional

PISG - Perímetro Irrigado de São Gonçalo

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RN - Rio Grande do Norte

RTK - *Real Time Kinematic*

SBES - *Single Beam Echo Sounders*

SGB - Sistema Geodésico Brasileiro

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SIRGAS 2000 - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SisCAH - Sistema Computacional para Análises Hidrológicas

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

SWE - *Shallow Water Equations*

TCU - Tribunal de Contas da União

TR - Tempo de Retorno

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	16
2.1 Objetivos	16
2.2 Justificativa	16
3. REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1 O Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional	18
3.2 Disponibilidade e demanda hídrica	19
3.3 Levantamento batimétrico	21
3.4 Perfilamento a laser	22
3.5 Modelagem hidrológica	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 Área de estudo	25
4.2 Metodologia	29
4.2.1. Base cartográfica	29
4.2.2. Estudos e análises hidrológicas	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Base cartográfica	41
5.2 Estudos e análises hidrológicas	51
5.3 Impacto das vazões de regularização e análise da base de dados	53
6. CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS	58
APÊNDICES	61
ANEXOS	62

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que, historicamente, enfrenta grandes problemas nos âmbitos econômico e social, e muitos deles estão intrinsecamente relacionados à escassez de água. Isto pois, apesar de ser um dos maiores recursos naturais existentes, nem toda a população tem acesso fácil, regular e de qualidade a ela (Oliveira & Silveira, 2018; MDR, 2019). A gestão destes recursos é, tanto pela falta de informações precisas quanto pela dificuldade de monitoramento, um grande desafio global (Vitor, 2021).

A realidade vivenciada no país demonstra uma disparidade alarmante em relação à distribuição de água e, por isso, várias regiões brasileiras têm sofrido situações de escassez nos últimos anos (ANA, 2017). Enquanto regiões como a Amazônia e a bacia do rio São Francisco possuem abundância hídrica, diversas áreas do Nordeste e do Centro-Oeste sofrem com a falta de água.

Nos casos em que a disponibilidade hídrica é reduzida por natureza, as crises hídricas ocorrem por períodos mais longos, acarretando em impactos negativos ainda maiores (ANA, 2019). Para solucionar esse problema e garantir a segurança hídrica para a população faz-se necessário, frequentemente, a implantação de empreendimentos de acumulação de água. Estes permitem que mais pessoas sejam atendidas, mais produtos agrícolas sejam produzidos, mais eletricidade seja gerada, dentre outros (Oliveira & Lima, 2019).

Por este motivo, a maior obra de infraestrutura hídrica do país foi idealizada: a Transposição do Rio São Francisco, por meio do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). Este foi concebido como uma solução para enfrentar a seca e garantir o abastecimento de água em diversos estados do Nordeste, beneficiando a população e promovendo o desenvolvimento regional (Pires, 2019).

O projeto é um empreendimento do Governo Federal, sob responsabilidade do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), com a participação do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF) na operação e manutenção das estruturas da transposição.

Em suma, as obras objetivam fornecer água para consumo humano, irrigação de áreas agrícolas e dessedentação animal, além da regularização de rios, por meio

de dois canais independentes de obras hidráulicas, denominados Eixo Norte e Eixo Leste, e por diversas obras acessórias, como os ramais associados de Entremontes, do Agreste, do Salgado e do Apodi. As bacias receptoras abrangem os territórios dos estados do Ceará (CE), Paraíba (PB), Pernambuco (PE) e Rio Grande do Norte (RN) que, atualmente, apresentam grande vulnerabilidade hídrica (MDR, 2021; Ferreira et al., 2022). Têm-se a prerrogativa de, ao todo, assegurar água para mais de 12 milhões de pessoas em 390 municípios do Nordeste Setentrional por meio de 13 aquedutos, 9 estações de bombeamento, 27 reservatórios e 270 quilômetros de linhas de transmissão em alta tensão (MDR, 2021).

Alguns projetos complementares, também contratados pelo Governo Federal, são fundamentais para garantir e complementar a efetiva distribuição da água do PISF para regiões que não são diretamente cobertas pelos canais principais. Elas atendem demandas específicas de abastecimento em diversos municípios e áreas agrícolas, além de reduzir conflitos existentes entre os usuários (Ferreira et al., 2022).

Dentre esses projetos, destaca-se um que objetivou realizar diversos estudos que permitissem a passagem da água entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte pela derivação das águas do Eixo Norte do PISF na calha do rio Piranhas-Açu, a partir do reservatório Engenheiro Ávidos (PB) até sua entrega no reservatório Armando Ribeiro Gonçalves (RN). Com isso, conforme comentado anteriormente, além da redução significativa nos conflitos existentes entre os usuários da água da bacia e a diminuição do sofrimento das populações mais castigadas com a seca, haverá um grande desenvolvimento das regiões do semiárido (Ferreira et al., 2022).

Para garantir a viabilidade e a eficiência do transporte hídrico neste rio, é essencial o desenvolvimento de modelos hidrológicos precisos, que considerem informações detalhadas sobre relevo subaquático e topografia adjacente. No entanto, abordagens tradicionais de modelagem hidrológica frequentemente enfrentam desafios devido à falta de dados espaciais de alta resolução, o que pode comprometer a precisão das simulações de fluxo. Assim, técnicas que integrem múltiplas fontes de dados geoespaciais tornam-se fundamentais para aprimorar a compreensão dos processos hidrológicos na região. A qualidade dessas informações influencia diretamente a previsão dos fluxos d'água, a identificação de riscos e o planejamento de medidas mitigadoras, tornando-se, portanto, indispensáveis para a gestão hídrica da bacia.

Assim, a integração de dados de perfilamento a laser e batimetria monofeixe surge como uma abordagem inovadora para aprimorar a modelagem hidrológica e possibilitar uma gestão hídrica mais eficaz. A combinação dessas tecnologias permite a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de alta precisão, possibilitando análises detalhadas da dinâmica do fluxo de água e identificação de áreas críticas para possíveis perdas ou restrições hidráulicas.

Diante do exposto, o presente estudo objetiva avaliar a integração de dados provenientes do perfilamento a laser com restituição aerofotogramétrica e de dados batimétricos adquiridos por sistemas de monofeixe na modelagem hidrológica. Essa abordagem integrada não só aprimora a representação geométrica e dinâmica da bacia, mas também viabiliza a identificação dos potenciais impactos decorrentes da liberação da vazão do PISF na calha do rio Piranhas-Açu, contribuindo para o desenvolvimento de intervenções mitigadoras

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

2.1 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo principal realizar simulações hidrológicas a partir de dados de alta resolução provenientes de levantamentos batimétricos, aerofotogramétricos e LiDAR. A finalidade é identificar, analisar e prever potenciais impactos causados pela liberação da vazão do PISF na calha do rio Piranhas-Açu, fornecendo subsídios técnicos para o planejamento de medidas mitigadoras e ações preventivas.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Coletar, processar, analisar e integrar de dados de batimetria monofeixe e LiDAR aerotransportado na região do rio Piranhas-Açu;
- Desenvolver um modelo hidrológico detalhado que permita simular a dinâmica do fluxo de água no rio, considerando a liberação da vazão do PISF;
- Avaliar a viabilidade do transporte de água do reservatório Engenheiro Ávidos (PB) até o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves (RN), identificando possíveis impactos no entorno;
- Fornecer subsídios técnicos para o planejamento de intervenções e obras de infraestrutura que possam mitigar os possíveis impactos;
- Contribuir para a expansão do conhecimento científico na área de modelagem hidrológica, utilizando tecnologias de alta precisão e integração de dados geoespaciais para otimizar a gestão hídrica em regiões semiáridas.

2.2 Justificativa

A gestão eficiente dos recursos hídricos é um desafio global, especialmente em regiões semiáridas, onde a escassez hídrica e a irregularidade na distribuição das chuvas impactam diretamente a segurança hídrica e o desenvolvimento socioeconômico. No Nordeste do Brasil, a variabilidade climática, associada à baixa capacidade de armazenamento natural dos aquíferos e à dependência de reservatórios superficiais, torna fundamental o planejamento e a implementação de soluções estruturais e tecnológicas para garantir a disponibilidade hídrica em longo prazo.

Nesse contexto, o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional representa uma das maiores iniciativas de infraestrutura hídrica do país, com o objetivo de atenuar os impactos da seca por meio da

transposição de águas entre diferentes bacias hidrográficas. Entretanto, a eficácia do PISF depende de uma distribuição eficiente da água ao longo dos trechos de escoamento. O trecho do Rio Piranhas-Açu, que liga o reservatório Engenheiro Ávidos (PB) ao reservatório Armando Ribeiro Gonçalves (RN), desempenha um papel fundamental como canal natural na região. Para viabilizar a passagem das águas do PISF de forma segura e sustentável, torna-se essencial a realização de estudos detalhados que assegurem a eficiência operacional e a integridade ambiental do projeto.

Neste cenário, a integração de dados LiDAR aerotransportados e batimetria monofeixe surge como uma solução inovadora, permitindo a obtenção de Modelos Digitais de Elevação de alta resolução que representam com maior acurácia a morfologia do leito fluvial e suas margens. Essa abordagem possibilita a criação de modelos hidrológicos mais detalhados, contribuindo para a otimização da gestão hídrica e o planejamento de futuras intervenções de infraestrutura.

Além disso, a adoção de técnicas avançadas de modelagem hidrológica, aliada à disponibilidade crescente de sensores remotos de alta precisão, representa um avanço significativo na caracterização da dinâmica hídrica de rios em regiões semiáridas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional

Grande parte da população nordestina convive historicamente com o problema da seca, especialmente o Semiárido. A recorrente escassez hídrica nessa região representa um dos principais desafios enfrentados pela população local. A economia da região é predominantemente baseada na agricultura e na pecuária em pequenas propriedades familiares, atividades altamente vulneráveis às variações climáticas. A persistência de baixos índices pluviométricos ao longo dos anos compromete significativamente a produção de alimentos, colocando em risco a segurança alimentar das famílias. Estudos históricos indicam que, nos últimos três séculos, em aproximadamente 85 anos desse período, a precipitação foi insuficiente, irregular ou até mesmo inexistente na região (Castro, 2011).

Diante dos desafios impostos pelas condições climáticas adversas, a região tem sido objeto de iniciativas governamentais desde o período da Independência. Conforme Castro (2011), as políticas públicas desenvolvidas ao longo da história buscaram, em essência, mitigar os impactos da seca e melhorar as condições de vida da população sertaneja, especialmente no que tange à sua adaptação às limitações impostas pelo clima semiárido.

Dentre as propostas históricas para enfrentamento da escassez hídrica no Semiárido, destaca-se o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, que percorreu um longo e complexo trajeto, marcado por sucessivas reformulações, períodos de abandono e retomadas em distintos contextos políticos e socioeconômicos, muitas vezes com consideráveis intervalos entre as tentativas de execução (Castro, 2011).

A proposta de transposição do rio São Francisco surgiu em 1847, quando o engenheiro Marcos de Macedo apresentou a ideia ao imperador Dom Pedro II, sem avanços concretos. Durante o Segundo Reinado, a questão foi retomada em 1856 por uma comissão científica, que recomendou a construção de um canal até o rio Jaguaribe, mas o projeto foi arquivado. No período republicano, novos estudos ocorreram em 1909 e 1919, também sem implementação. No governo Getúlio Vargas, o DNOCS retomou a proposta, que reapareceu em 1981, mas foi novamente arquivada.

Em 1993, o ministro da Integração Nacional, Aluísio Alves, propôs a construção de um canal em Cabrobó para transferir águas do rio São Francisco ao Ceará e Rio Grande do Norte. Contudo, em 1994, um parecer do Tribunal de Contas da União (TCU) levou ao arquivamento do projeto. Durante os mandatos de Fernando Henrique Cardoso (1995-2002), novas propostas foram apresentadas por diferentes órgãos, mas não avançaram. A transposição voltou à pauta no primeiro governo Lula (2003-2006), quando o então ministro Ciro Gomes recebeu a incumbência de viabilizar a obra.

As obras foram iniciadas após assinatura da ordem de serviço, em 2007, e estavam previstas para terminar em 2012, mas os atrasos adiaram a entrega por mais de uma década. Atualmente, todas as obras necessárias para a condução das águas foram finalizadas no Eixo Leste, restando apenas serviços complementares que não comprometem a operação do trecho. Entre esses serviços estão o tratamento dos taludes, melhoria de estradas de acesso, execução de sistema para águas pluviais e instalação de equipamentos auxiliares de monitoramento. As estruturas principais do Eixo Norte já estão concluídas. Os serviços complementares ainda pendentes não interferem na pré-operação do sistema (MIDR, 2022).

O benefício esperado da transposição é o atendimento das demandas hídricas da população da região, que receberá parte da água do rio São Francisco. As demandas hídricas referem-se a áreas urbanas dos municípios beneficiados, distritos industriais, perímetros de irrigação e usos difusos ao longo dos canais e rios perenizados por açudes existentes que receberão águas do rio São Francisco (Ferreira et al., 2022).

3.2 Disponibilidade e demanda hídrica

A disponibilidade hídrica refere-se à quantidade total de água disponível em uma determinada área, levando em consideração a quantidade de água superficial e subterrânea. É uma medida da oferta de água na região, influenciada pela precipitação, recarga de aquíferos e fluxos de rios. Por outro lado, a demanda hídrica representa a quantidade de água necessária para atender às necessidades humanas, industriais e agrícolas em uma determinada área. É uma medida da utilização da água pela sociedade, levando em consideração a população, a atividade econômica e os padrões de consumo. Assim, enquanto a primeira se refere à oferta de água na natureza, a segunda representa a quantidade de água utilizada pelas atividades

humanas, podendo exceder a disponibilidade em áreas onde a demanda é alta e os recursos hídricos são limitados.

Por isso, o conhecimento da disponibilidade, do fluxo e dos usos de água no país é fundamental para embasar ações de planejamento, regulação e gestão nas bacias hidrográficas (ANA, 2017; Kuhnen, 2020). Assim, a relação entre esses elementos, além de servir de suporte à gestão hídrica, possibilita a identificação de áreas críticas quanto à quantidade e/ou à qualidade da água (ANA, 2017).

Reitera-se que a demanda por uso de água no Brasil é cada vez maior. Nas últimas décadas houve um aumento expressivo de mais de 80% do total retirado de água. A previsão é que, até 2030, a retirada aumente mais 26% (ANA, 2019; Kuhnen, 2020). Esse fato contribui, ainda mais, para a comprovação da importância da gestão e distribuição adequada dos recursos hídricos. Dessa forma, o investimento em infraestrutura para segurança hídrica deve ser priorizado, a fim de garantir maior capacidade de reserva e de acesso à água (Porto & Azevedo, 2002; ANA, 2017; Kuhnen, 2020).

A região brasileira que mais sofre com problemas de distribuição hídrica é o Semiárido Setentrional. Aspectos físicos naturais como os baixos índices pluviométricos e a ausência de aquíferos devido ao solo cristalino da maior parte da região influenciam nos periódicos quadros de escassez hídrica. Ainda, aspectos políticos e econômicos também influenciam na escassez que atinge grande parte da população (Britto, 2013). Pode-se afirmar, portanto, que a distribuição hídrica é desigual e favorece os mais capitalizados (Petrella, 2002).

Para amenizar os efeitos da seca no Semiárido foram criadas, desde o Brasil Colonial, diversas políticas de combate e convivência com a seca. Nesse contexto, idealizou-se o PISF desde antes do Brasil República como política de combate à seca nordestina. Este, entretanto, foi implementado décadas depois (Barreto et al., 2019), com a construção de barragens e criação de reservatórios de água, a fim de aumentar a disponibilidade e garantir a segurança hídrica. Eles podem, além de armazenar água nos períodos úmidos, liberar parte do volume armazenado nos períodos de estiagem, regularizando as vazões (ANA, 2019).

Segundo a Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), barragem é “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de

substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”. Em contrapartida, reservatório pode ser definido como “acumulação não natural de água, de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos” (Brasil, 2010; Kuhnen, 2020).

3.3 Levantamento batimétrico

Os levantamentos batimétricos objetivam a aquisição de profundidades em diversos corpos hídricos, como rios, reservatórios, lagunas, portos, entre outros. Esses proporcionam a realização de diversos estudos e projetos por meio dos dados de profundidade e, conseqüentemente, permitem a modelagem do fundo submerso (Ferreira et al., 2019; Santos et al., 2019).

O principal equipamento utilizado para as sondagens é o ecobatímetro, que emite um pulso (*ping*) acústico através do transdutor que é refletido ao tocar no fundo e é recebido novamente para realizar o processamento da onda sonora. Por meio do tempo de emissão e recepção da onda, em conjunto com a velocidade do som na água, calcula-se a profundidade, conforme Equação (1) (Matias et al., 2010; Minhoni et al., 2017; Ferreira et al., 2019; IHO, 2020).

$$S = 0,5 \cdot v \cdot t \quad (1)$$

Em que S é a medida da profundidade bruta local; v é a velocidade de propagação do som na água; e t é o tempo gasto pelo sinal para ir ao fundo e retornar ao ecobatímetro.

Dentre os ecobatímetros empregados para a coleta de profundidade, pode-se citar sistemas *Multibeam Echo Sounders* (MBES) e *Single Beam Echo Sounders* (SBES). O MBES proporciona a representação completa do fundo submerso devido à elevada taxa de medição, com o conseqüente aumento da resolução e da capacidade de detecção de objetos (IHO, 2005; USACE, 2013; Maleika, 2015). Contudo, esses sistemas apresentam custos de aquisição elevados e exigem um processamento de dados consideravelmente mais complexo, além de demandarem operadores com alta especialização. Ademais, a mobilização e o emprego dos MBES em ambientes fluviais de baixa profundidade revelam-se excessivamente morosos, elevando os custos de aquisição a patamares que, muitas vezes, se mostram inviáveis para aplicações em rios.

Por outro lado, o SBES apresenta-se como uma tecnologia de baixo custo, caracterizada pela aquisição de uma única medida de profundidade por ciclo de

medição. Essa abordagem, associada à facilidade de operação e à menor necessidade de operadores especializados, justifica sua ampla aplicação em levantamentos batimétricos (Santos et al., 2019). No cenário brasileiro, o emprego do SBES é regulado tanto pela Agência Nacional de Águas (ANA) quanto pela Marinha do Brasil (MB), o que reforça a sua confiabilidade e adequação para trabalhos em reservatórios e demais corpos hídricos interiores. Outras organizações também endossam essa tecnologia, recomendando sua utilização para a realização de levantamentos batimétricos em ambientes de águas interiores, dada sua eficiência e viabilidade econômica.

3.4 Perfilamento a laser

A tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR), também conhecida por Perfilamento a Laser, permite a obtenção de informações altimétricas da superfície terrestre com alta precisão (Neves, 2019; Kuhnen, 2020). Ela é capaz de obter coordenadas tridimensionais de objetos de maneira eficaz, ágil e segura, por meio da geração, emissão e captura de pulsos conhecidos por *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER), integrados com dados do sistema de posicionamento *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e do sistema de navegação *Inertial Measurement Unit* (IMU) (Wehr e Lohr, 1999; Baltsavias, 1999; Brandalize, 2001).

O laser é um sensor capaz de medir distâncias e, assim, gerar dados de altitude dos elementos da superfície. O recobrimento a laser da superfície terrestre é realizado por diversas faixas de voo, sendo que o sistema de gerenciamento do perfilamento executa a integração dos dados provenientes dos receptores GNSS, do sistema inercial IMU e do LASER (Kuhnen, 2020).

O princípio básico do sistema de varredura a laser consiste na utilização de um feixe de laser que é emitido, com auxílio de um espelho de varredura, em direção aos objetos. O feixe é refletido ao atingir a superfície destes objetos, retornando um eco ao sistema. O sistema é, então, encarregado de registrar o tempo decorrido entre a emissão e a captação do sinal, permitindo a obtenção da distância entre o sensor e o objeto iluminado (Galvanin e Poz, 2013; Neves, 2019).

Uma das características desse sistema é a medição do primeiro e do último retorno de cada pulso. O primeiro retorno é o mais próximo do sensor, enquanto o último retorno é o mais distante (normalmente determinado pelo solo) (Kuhnen, 2020).

O conjunto de dados adquiridos gera uma nuvem de pontos. Estes são classificados conforme a elevação, por meio da identificação dos pontos do terreno e de vegetação ou edificações.

É possível transformar a nuvem de pontos em Redes Triangulares Irregulares, nas quais cada ponto torna-se um vértice de um triângulo, ou a partir de métodos de interpolação, em grades regulares. Quando a transformação é realizada considerando todos os pontos obtidos no mapeamento, incluindo vegetação, edificações, linhas de transmissão, dentre outros, o resultado é o Modelo Digital de Elevação (MDE). Quando a nuvem de pontos é filtrada, por meio de algoritmos e ajustes manuais para remoção destes elementos sobre a superfície do terreno, tem-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) (Neves, 2019).

3.5 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, permitindo a compreensão e a previsão do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Por meio de modelos matemáticos, é possível simular processos como escoamento superficial, infiltração e evapotranspiração, auxiliando na tomada de decisões relacionadas à disponibilidade hídrica, controle de inundações e uso sustentável da água.

Um exemplo de software amplamente utilizado para confecção de modelos hidrológicos é o HEC-RAS, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Ele é capaz de simular o fluxo da água e o transporte de sedimentos em rios e canais, considerando uma variedade de condições hidráulicas e características do canal. Ainda, incorpora equações hidrodinâmicas e sedimentares, permitindo a simulação do transporte de sedimentos em suspensão e em leito (Brunner, 2021).

No Brasil, a aplicação de modelos hidrológicos tem se mostrado particularmente relevante devido à diversidade climática e à extensão territorial do país. Estudos recentes demonstram a utilização de diferentes abordagens de modelagem para atender às especificidades regionais. Por exemplo, a modelagem hidrológica determinística e estocástica foi aplicada para simular a vazão mensal das sub-bacias da região hidrográfica do Xingu, no estado do Pará, destacando a importância de modelos adaptados às características locais (Lucas et al., 2009).

A escolha do modelo adequado depende de diversos fatores, incluindo a disponibilidade de dados, os objetivos do estudo e as características específicas da bacia hidrográfica em questão. A contínua evolução das técnicas de modelagem e a crescente disponibilidade de dados de alta resolução contribuem para o aprimoramento das simulações hidrológicas, fortalecendo a gestão sustentável dos recursos hídricos no Brasil.

Em estudos de impacto da transposição de água em rios intermitentes, como no caso do Projeto de Integração do Rio São Francisco, a utilização de modelos distribuídos baseados em dados topográficos de alta precisão é essencial para prever efeitos sobre a calha do rio e populações ribeirinhas (Ferreira et al., 2021).

Embora modelos digitais de elevação gratuitos, como o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), sejam amplamente utilizados, suas limitações em termos de resolução espacial podem comprometer a precisão dos resultados. Estudos recentes demonstram que a integração de dados de batimetria e LiDAR melhora significativamente a qualidade das modelagens hidrológicas, proporcionando informações mais confiáveis para a tomada de decisão em projetos de gestão hídrica (Ferreira et al., 2022).

Dessa forma, a modelagem hidrológica desempenha um papel crucial no planejamento e na gestão de recursos hídricos, permitindo simular cenários, prever impactos e embasar a implementação de medidas mitigadoras. O avanço na precisão dos modelos, com o uso de dados de alta resolução, representa um grande potencial para a melhoria da segurança hídrica em regiões vulneráveis.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

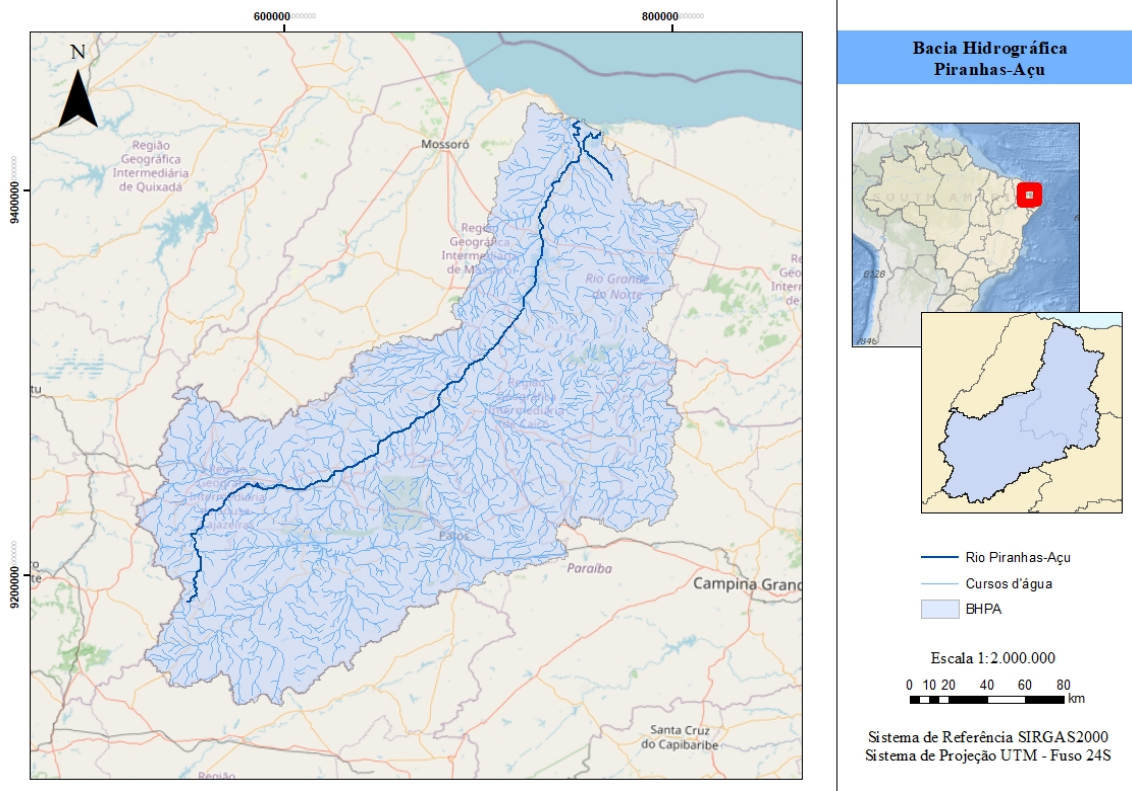
A área de estudo deste projeto compreende o Rio Piranhas-Açu e, conseqüentemente, a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açu (BHPA). Essas áreas foram escolhidas pois apresentam grande importância para o PISF e possuem uma extensa base de dados, fator crucial para o desenvolvimento desta pesquisa.

Dentre as bacias receptoras das águas provenientes da transposição, destaca-se a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açu, que pertence à região hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental e está localizada na região nordeste brasileira, nos estados da Paraíba (PB) e do Rio Grande do Norte (RN) (Figura 1). Totalmente inserida no clima semiárido nordestino, a bacia é caracterizada por chuvas concentradas em poucos meses do ano (ANA, 2016).

Ao todo, a bacia abrange 147 municípios do nordeste brasileiro, possuindo uma área de drenagem de 43.681,50 km². Desta área, 60% pertencem ao estado da PB e 40% ao RN. O principal rio da bacia é o rio Piranhas-Açu, que é de domínio federal, visto que sua nascente está localizada no município de Bonito de Santa Fé, na PB, e segue seu curso natural pelo RN, desaguando no Oceano Atlântico, na Costa Potiguar (AESAs, 2021).

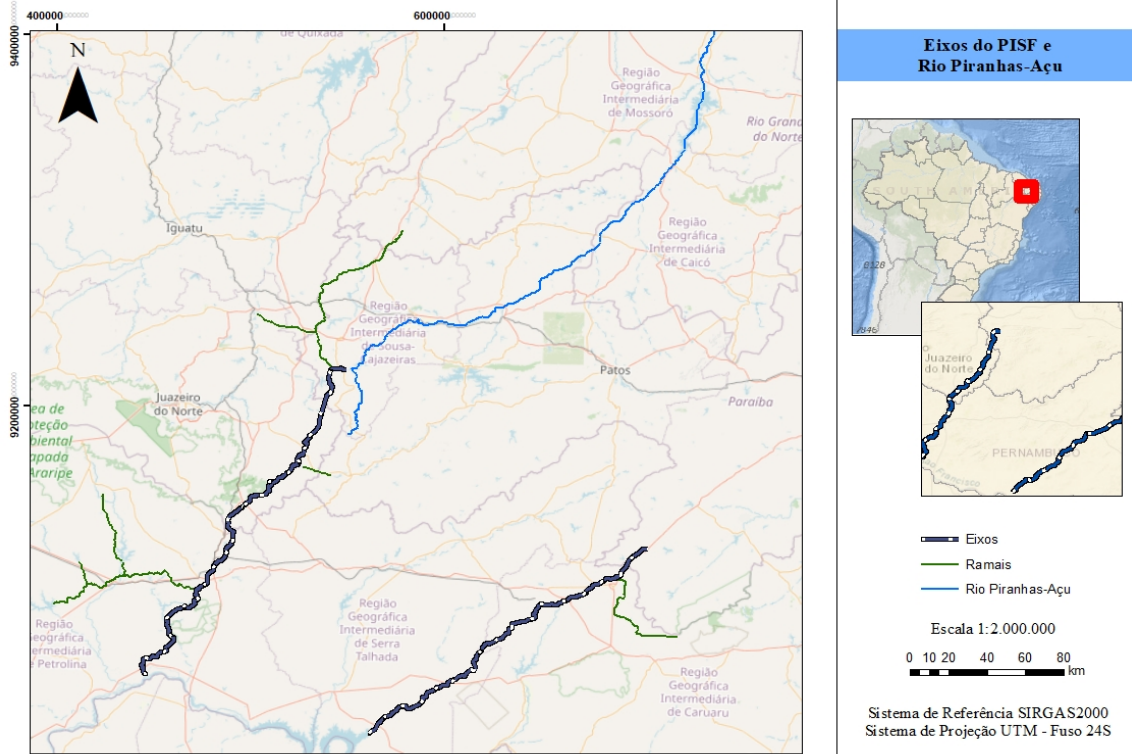
O Rio Piranhas-Açu permitirá a derivação das águas do Eixo Norte do PISF em sua calha e, conseqüentemente, possibilitará a passagem da água entre os estados da PB e do RN a partir do reservatório Engenheiro Ávidos (PB) até sua entrega no reservatório Armando Ribeiro Gonçalves (RN), conforme Resolução N. 1133, de 19 de setembro de 2016 e na Resolução N. 411/2005 (Figura 2).

Figura 1- Bacia Hidrográfica Piranhas-Açu.



Fonte: A autora.

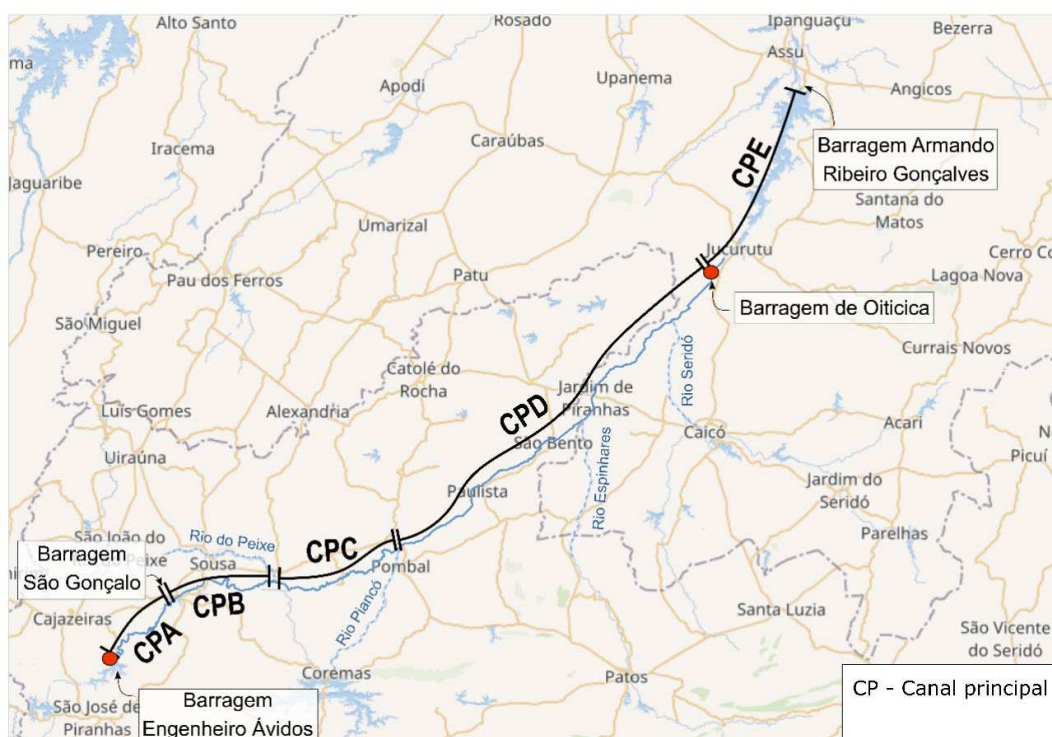
Figura 2 - Eixos do PISF e Rio Piranhas-Açu.



Fonte: A autora.

Por se tratar de uma região extensa – aproximadamente 290 km entre o reservatório de Engenheiro Ávidos e o reservatório de Armando Ribeiro Gonçalves -, optou-se por dividir o rio Piranhas-Açu em trechos visando a melhor organização do trabalho e maior entendimento sobre as características da área de estudo. Foram considerados aspectos topográficos e geológicos, além de outras características como largura e profundidade da calha, uso e ocupação do solo e áreas afetadas. O rio foi categorizado em cinco trechos, sendo eles CPA, CPB, CPC, CPD E CPE (Figura 3).

Figura 3 – Divisão dos trechos da área de estudo.



Fonte: A autora.

O trecho inicial (CPA) compreende a região à jusante da Barragem Engenheiro Ávidos até o início do reservatório da Barragem São Gonçalo, com extensão de aproximadamente 28 km. Nesse trecho, conforme Rodrigues e Souza (2021), o rio possui leito fluvial arenoso e sem delimitação rígida, com planícies de inundação contínuas em mais de 90%, em ambas as margens. Por não haver contenção natural das margens, nos períodos chuvosos há grande probabilidade de extravasamento do fluxo. Em geral, a calha possui larguras aproximadas de até 50 m e profundidade média de 3 m.

O segundo trecho (CPB) inicia-se à jusante da Barragem São Gonçalo e finaliza na confluência com o Rio do Peixe (próximo ao município de Aparecida - PB). O trecho possui comprimento de aproximadamente 34 km, abrangendo áreas de grande atividade econômica da região, como o Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG), projeto de responsabilidade do DNOCS; e o Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado Várzeas de Souza (DPIVAS), projeto de responsabilidade do Governo do Estado da Paraíba. O rio possui a mesma característica da calha do trecho A – leito fluvial arenoso - porém há risco da diminuição da eficiência de drenagem dos solos dos perímetros irrigados, pelo possível remanso nos drenos.

O terceiro trecho (CPC) inicia-se na região à jusante da confluência com o Rio do Peixe até confluência com o Rio Piancó, no município de Pombal - PB (extensão de aproximadamente 46 km). Neste, o rio possui o leito do rio arenoso e parcialmente confinado, com margens controladas por substrato rochoso, apresenta canal único, com planícies de inundação, barras, ilhas e terraço na margem esquerda, principalmente, por encostas que impedem o extravasamento do fluxo. Esse trecho possui leito arenoso, com relevo de superfície plana, de 0,08% de declividade, com uma área de drenagem de 5.809 km². A forte característica desse trecho é que tanto no período chuvoso quanto no período seco, amplas faixas de material arenoso se acumulam no leito.

O quarto trecho (CPD) compreende a região à jusante da confluência com o Rio Piancó até o início reservatório da Barragem Oiticica, no Rio Grande do Norte (aproximadamente 112 km). Destaca-se nessa região as vazões de regularização do Rio Piancó, oriundas do Sistema Hídrico dos reservatórios Corema-Mãe D'água, município de Coremas - PB.

O último trecho (CPE) inicia-se à jusante da Barragem Oiticica e finaliza no reservatório da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves.

Os trechos CPD e CPE apresentam leito de textura cascalhenta, sugerindo fluxo com potencial de transporte de sedimentos de menor diâmetro (areia, silte e argila). Apresenta substrato rochoso que expõe diversas formações rochosas. A largura média da calha é de aproximadamente 63,4 m com profundidade de 2,9 m.

4.2 Metodologia

A metodologia proposta neste estudo baseia-se na utilização de dados geospaciais de alta resolução, provenientes de levantamentos batimétricos, aerofotogramétricos e LiDAR, em modelagens hidrológicas a fim de identificar, analisar e prever potenciais impactos causados pela liberação da vazão do PISF na calha do rio Piranhas-Açu.

Na Figura 4 são ilustrados os passos da metodologia proposta.

Figura 4 – Representação esquemática da metodologia.



Fonte: A autora.

4.2.1. Base cartográfica

Primeiramente fez-se necessária a confecção e organização da base cartográfica. Isto inclui o levantamento e o tratamento dos dados batimétricos, aerofotogramétricos e LiDAR da região estudada.

Para realização dos levantamentos uma ampla rede geodésica foi implantada, a fim de referenciá-los. Assim, visando o emprego de estações existentes ativas do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) como referência, foram utilizadas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Foram identificadas todas as estações no entorno da área de estudo e, na sequência, novos vértices foram implantados, cujas coordenadas

foram determinadas a partir das estações de referência. Além destas, também foram empregadas estações GNSS com conexão de RRNN (SAT/RN) do IBGE (estações passivas). Estas compõem a Rede de Apoio Básico.

Destaca-se que as estações da rede ativa foram utilizadas na determinação das coordenadas dos vértices implantados na área de estudo, enquanto as estações da rede passiva apoiaram a confecção do Modelo Geoidal Local (MGL). Para complementar a rede de apoio, considerou-se informações de marcos geodésicos da ANA presentes ao entorno dos açudes da área de estudo (Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Armando Ribeiro).

Ademais, também foram considerados pontos de apoio suplementares, a serem utilizados posteriormente como pontos de controle e pontos de checagem para amarração dos modelos fotogramétricos.

O levantamento geodésico envolveu a determinação de coordenadas geodésicas e altitudes para os vértices da Rede de Apoio Básico e do Apoio Suplementar, utilizando receptores GNSS de dupla frequência (L1/L2) e técnicas de posicionamento relativo estático. Para a Rede de Apoio Básico, foram empregadas sete estações da RBMC do IBGE, garantindo rastreamento mínimo de seis horas para a resolução das ambiguidades. No Apoio Suplementar, um vértice base foi utilizado, com tempos de rastreamento entre 40 minutos e duas horas, conforme a categoria do ponto levantado.

O processamento foi realizado e a rede foi ajustada pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e validada por testes estatísticos (Qui-Quadrado e Teste Tau) com nível de confiança de 95%. Foram aceitas apenas precisões pontuais de até 10 cm nas componentes horizontais e na altura geométrica, garantindo a qualidade dos dados levantados.

Em seguida, os fatores de conversão foram determinados pela diferença entre as altitudes geométricas (levantamentos geodésicos) e as altitudes normais (nivelamentos geométricos) dos pontos. Com isso, foi possível elaborar o MGL, utilizado para converter altitudes geométricas em altitudes normais, conforme Equação (2). Nesse contexto, foram calculadas as altitudes normais tanto dos vértices de apoio suplementar quanto da nuvem de pontos obtida pelo perfilamento a laser.

$$\eta = h - H^N \quad (2)$$

Em que η é o fator de conversão obtido com base nos dados de campo; h é a altitude geométrica medida com recurso a receptores GNSS, e H^N é a altitude normal medida com recurso a técnicas de nivelamento.

Assim, de posse dos dados da rede geodésica, foi possível proceder com o voo fotogramétrico e perfilamento a laser. Previamente à execução do voo, foi realizado um planeamento com o objetivo de definir a geometria ideal de recobrimento aerofotogramétrico, de modo a garantir a cobertura estereoscópica completa de toda a área de interesse, em conformidade com as especificações técnicas.

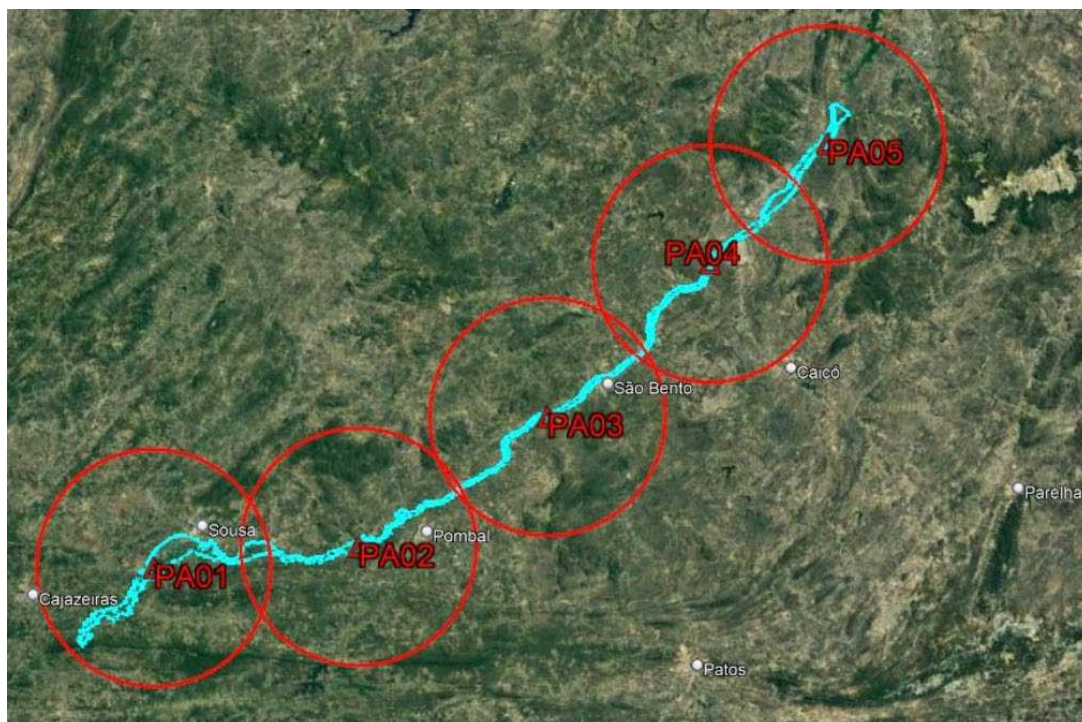
Duante a elaboração do plano de voo, considerou-se diversos parâmetros técnicos. A superposição lateral entre faixas foi analisada de forma a garantir que todos os pontos da área de interesse possuíssem recobrimento adequado. A direção do voo foi definida com base no alinhamento mais eficiente das faixas em relação à área de interesse. A resolução espacial adotada foi de 10 cm, com superposição lateral de 30% e superposição longitudinal de 60%. A altura média do voo foi estabelecida em 800 metros.

Foi sobrevoada uma área superior a 290 km² com aeronave especialmente preparada para essas operações, com equipamentos de alta sensibilidade para aquisição de dados de posicionamento precisos no momento de tomada das imagens.

Empregou-se a metodologia de voo integrado por sensores, na qual o sistema é composto por um receptor GNSS geodésico em conjunto com uma IMU, responsável pelo registro dos ângulos de inclinação da aeronave, bem como das observáveis GNSS.

Destaca-se que a distância entre os extremos das faixas e as bases de apoio de campo para os sensores que demandam controle terrestre durante o voo respeitou o limite máximo de 25 km. Ilustra-se, na Figura 5, o plano de voo.

Figura 5 – Plano de voo.



Fonte: A autora.

Na execução do perfilamento a laser foi utilizado um sistema que permite o controle dos parâmetros necessários à boa qualidade do voo, como a visualização em tempo real da completude, ajustes de parâmetros de configuração de coleta, qualidade e continuidade dos dados GNSS/IMU. Além disso, a tecnologia LiDAR empregada permitiu o registro de múltiplos retornos, possibilitando a determinação da altura de objetos sobre a superfície mapeada. Destaca-se que a densidade média de coleta foi de 4 pontos/m².

O processamento do voo aerofotogramétrico utilizou algoritmos como solução GNSS e filtro de Kalman, obtendo os elementos de orientação exterior X,Y,Z dos centros perspectivos e os ângulos ω , ϕ e k para cada imagem, com alta precisão. Ademais, o tratamento dos dados adquiridos, como a realização dos processos de filtragem, suavização e equalização, foram efetuados para garantir o padrão de qualidade das imagens, além, também, do processo de ortorretificação das fotografias, possibilitando a geração de uma ortofoto.

O processamento dos dados laser foi realizado observando, primeiramente, a trajetória seguida pela aeronave e a qualidade do voo executado. Em um segundo

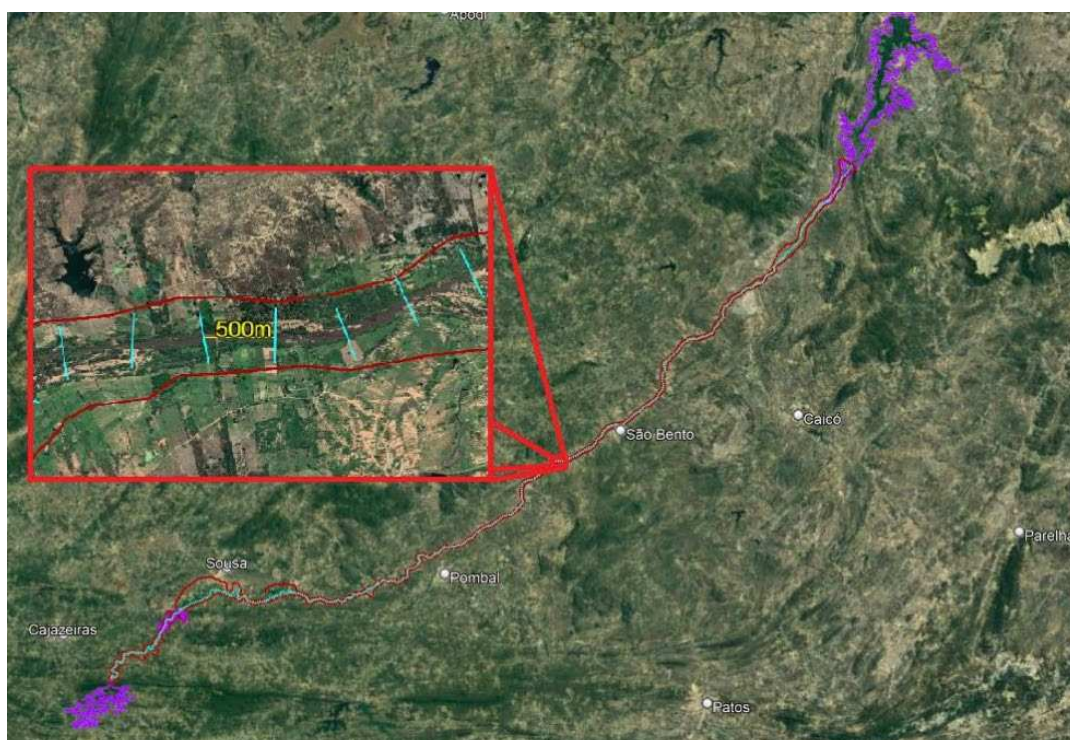
momento, foi efetuada a geração da malha de pontos e a classificação automática para a constituição do MDT.

A realização do controle de qualidade da geração do MDT foi efetuada seguindo os elementos de qualidade de Acurácia Posicional, Completude e Consistência Lógica.

De posse dos dados do levantamento da área seca, segue-se, então, para o levantamento da área molhada, a fim de confeccionar um MDT completo da área de estudo. Nesse sentido, um levantamento batimétrico foi realizado ao longo do trecho trabalhado do rio Piranhas-Açu. Foram planejadas e executadas 500 seções batimétricas, espaçadas por 500 metros.

As linhas de sondagem foram planejadas perpendicularmente ao eixo do curso d'água (Figura 6) e, para execução do levantamento, foram utilizados dois tipos de equipamento, a depender da profundidade e possibilidade de navegação do local: ecobatímetro, para medição de profundidades numa alta taxa de amostragem, juntamente com um sistema de posicionamento em tempo real da embarcação para os casos navegáveis; ou somente um receptor geodésico, também de posicionamento em tempo real, para condições inavegáveis.

Figura 6 – Planejamento da campanha batimétrica.



Fonte: A autora.

Assim, quando possível, o levantamento batimétrico foi realizado com um ecobatímetro monofeixe, acoplado em uma embarcação junto à receptores GNSS. Dessa forma, enquanto as profundidades foram obtidas por métodos geoacústicos, o posicionamento foi realizado por meio de métodos diferenciais, possibilitando que as profundidades estivessem, sempre, associadas a uma posição na superfície da água. O levantamento e o processamento foram executados no software Hypack, versão 2022. O tratamento dos dados foi conduzido de maneira a eliminar possíveis problemas posicionais e *spikes*, bem como desvios nos demais parâmetros levantados (velocidade do som, dados do nível da água, dentre outros).

Entretanto, devido às condições do rio no trecho estudado (baixas profundidade e, conseqüentemente, impossibilidade de navegação de embarcações) e da época do levantamento, a maioria das seções foram executadas com a tecnologia GNSS. Assim, o levantamento topobatimétrico, semelhante ao levantamento topográfico convencional, foi realizado. A coleta de informações foi executada pelos equipamentos GNSS, com metodologia de posicionamento *Real Time Kinematic* (RTK).

Dessa forma, de posse de todos os dados, foi possível caracterizar e mapear a área molhada, detalhando a morfologia de fundo do trecho em estudo. Ressalta-se que as regiões entre as seções batimétricas foram interpoladas para caracterizar todo o relevo.

Por fim, os dados obtidos por meio do levantamento batimétrico e do perfilamento a laser foram integrados, permitindo a consolidação das informações da parte submersa, mapeada pelo levantamento batimétrico, com a parte emersa, obtida por meio do perfilamento a laser. Ambos os levantamentos foram submetidos a rigorosos processos de validação e garantia de qualidade.

Após análise, validação e preparação dos insumos, a interpolação foi realizada no software ArcGIS, versão 10.5, onde foram consolidadas todas as informações, gerando uma superfície contínua e uniforme. Como resultado dessa interpolação, obteve-se uma superfície contínua e consistente da morfologia do terreno.

Com a conclusão da etapa de confecção da base cartográfica, inicia-se a fase de modelagens hidrológicas.

4.2.2. Estudos e análises hidrológicas

Com a base cartográfica devidamente elaborada, o próximo passo consiste na realização dos estudos hidrológicos, fundamentais para a compreensão do regime de escoamento ao longo do trecho analisado. Considerando a extensão do rio em estudo, torna-se essencial a avaliação das vazões ao longo de seu percurso, uma vez que suas características variam em função de fatores como topografia, pluviometria, uso e cobertura do solo, além da presença de intervenções antrópicas.

O estudo das vazões visa caracterizar a disponibilidade hídrica e identificar padrões de variação ao longo do rio, servindo como base para as análises subsequentes e para a consideração da liberação da vazão advinda do PISF. Para isso, serão utilizadas séries históricas de dados fluviométricos provenientes de estações da região, permitindo a identificação de tendências sazonais e variações espaciais no regime de escoamento.

Desse modo, em primeiro momento, foram utilizados dados de vazões provenientes de estações fluviométricas de responsabilidade da ANA e operadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Estações fluviométricas selecionadas para estudo das vazões.

Nome	Código	Latitude (graus decimais)	Longitude (graus decimais)	Período de Dados
Várzea Grande	37220000	-6.9192	-38.3808	1962 - 2020
São Domingos do Pombal	37297000	-6.8022	-37.9347	2000 - 2020
Sítio Vassouras	37410000	-6.7258	-37.7975	1973 - 2020
Jardim de Piranhas	37470000	-6.3781	-37.3525	1973 - 2020
Jucurutu	37604000	-6.0342	-37.0156	2009 - 2020

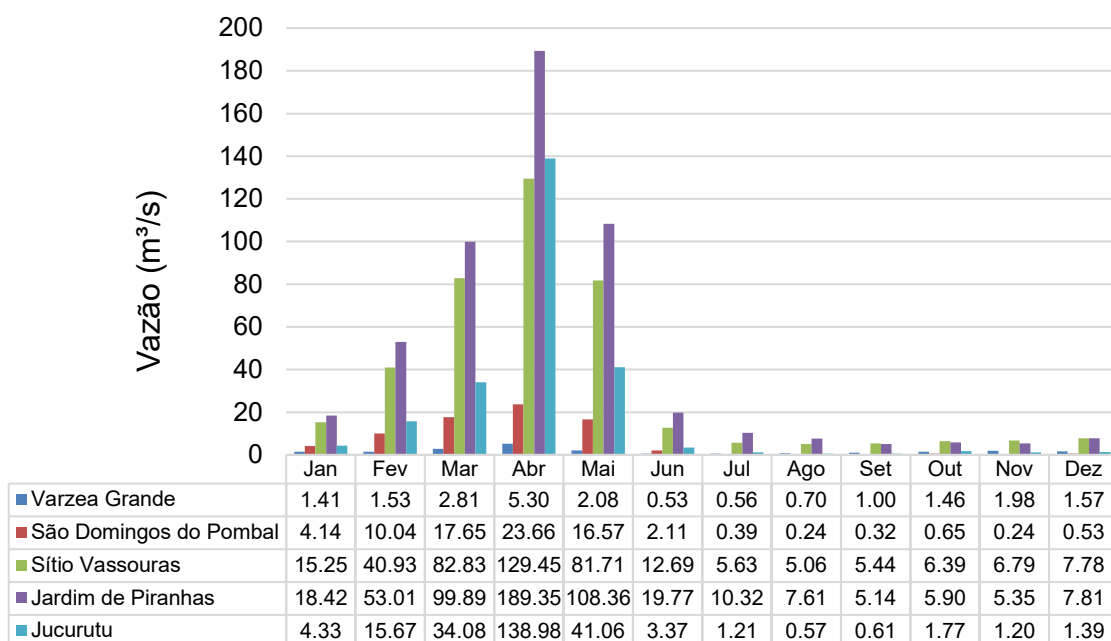
Fonte: A autora.

Para cada estação considerou-se, também, a liberação da vazão advinda do PISF, de 53,48 m³/s, somada a vazão relativa ao Tempo de Retorno (TR) de 5 anos filtrado para o período de estiagem. Esta filtragem é justificada haja visto que a provável liberação da vazão máxima do PISF na calha do rio Piranhas-Açu ocorrerá a

partir de julho, quando as vazões deste curso d'água estão mínimas (Gráfico 1), visando regularizá-lo.

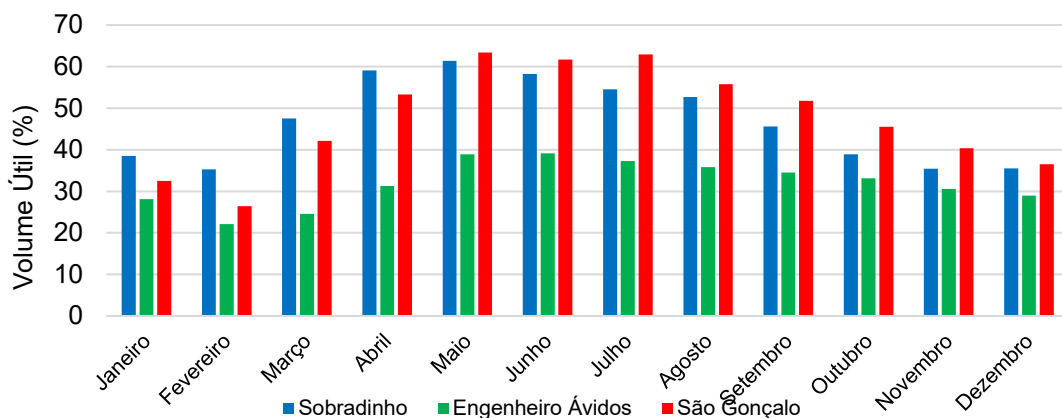
Além disso, são nos meses de maio e junho que os reservatórios de Sobradinho e Engenheiro Ávidos (de onde será liberada a vazão proveniente da transposição) atingem o ápice de seus volumes úteis, sendo que seus reservatórios começam a ser preenchidos com o início das chuvas no final do ano anterior (Gráfico 2).

Gráfico 1 – Vazão média mensal de longo prazo relacionadas às estações fluviométricas.



Fonte: A autora.

Gráfico 2 – Média mensal do volume útil dos reservatórios (2008 – 2021).



Fonte: A autora.

O cálculo das vazões estudadas foi realizado com o auxílio do Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SisCAH), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos, pertencente à Universidade Federal de Viçosa. Assim, fez-se necessário o cumprimento de algumas etapas, como o pré-processamento das séries históricas de cada estação fluviométrica escolhida para o estudo, a elaboração da curva de permanência das vazões e a estimativa das vazões máximas. Adotou-se como início do ano hidrológico o mês de dezembro, visto que neste inicia-se o aumento do volume de chuvas e, conseqüentemente, das vazões.

Portanto, no cálculo das vazões com TR de 5 anos para as cinco estações fluviométricas selecionadas, exclui-se os meses de janeiro a junho.

Para confecção do modelo hidrológico, necessita-se, além do MDT e das vazões, de informações da declividade média no trecho trabalhado e do coeficiente de rugosidade de Manning.

Logo, as declividades médias foram calculadas para os trechos listados na Tabela 1, utilizando o MDT. Na sequência, o coeficiente de rugosidade de Manning foi definido conforme as características ao longo da calha do rio Piranhas-Açu.

Conforme Porto (2006), este coeficiente é um dos principais parâmetros para a caracterização da vazão sobre uma superfície, calculado a partir da consideração de diversos fatores que interferem na velocidade do fluxo da água sobre o terreno, como a rugosidade, a sinuosidade e a irregularidade do canal, além da presença de obstruções (pontes, travessias, vegetação, resíduos sólidos, entre outros).

O coeficiente de Manning foi, então, definido conforme a divisão dos trechos apresentada anteriormente. A primeira parte entre a barragem de Engenheiro Ávidos e o reservatório de São Gonçalo (CPA), seguido do trecho entre a barragem de São Gonçalo até a transição entre o perímetro público com o perímetro privado de irrigação, próximo à estação fluviométrica de São Domingos do Pombal (CPB). A terceira parte inicia-se no ponto final anterior até o trecho onde o rio do Peixe desagua no Piranhas-Açu, próximo da cidade de Pombal (CPC). Por fim, a quarta parte inicia-se no final do trecho anterior até o reservatório de Armando Ribeiro Gonçalves (CPD e CPE).

Após a caracterização das vazões ao longo do trecho estudado e da definição da declividade e do coeficiente de Manning, a próxima etapa consiste na modelagem utilizando o *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS), desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica, uma instituição conjunta ao

Water Resources, do *US Army Corps of Engineers*. Este software, além de ser disponível gratuitamente e possibilitar a análise de escoamento em rios e canais abertos, é de sistema integrado, desenvolvido para uso interativo em um ambiente de rede multitarefa e multiusuários. O sistema é composto de interface gráfica, de componentes de análises hidráulicas distintas, armazenamento e gestão de banco de dados, recursos gráficos e geração de relatórios. Possui capacidade de análise de dados em formato unidimensional e bidimensional, e integração entre estes dois formatos, utilizando a mesma geometria e rotinas de cálculos hidráulicos. Também tem capacidade de integração de dados espaciais e sistema de mapeamento, o que permite visualizar informações com distintas camadas sobrepostas, ou seja, em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) (RAS-Mapper) (Brunner, 2021b).

O HEC-RAS possui três possibilidades de simulação de fluxo de vazão, estável, semi-estável e instável nos formatos uni e bidimensionais. As simulações do presente estudo foram realizadas com a de fluxo instável, a qual visa simular eventos característicos de canais naturais e abertos (Brunner, 2021a), como é o caso do rio Piranhas-Açu, utilizando geometria com base em modelo bidimensional, proveniente do MDT obtido por meio do levantamento com tecnologia LiDAR.

A aplicação selecionada para modelar o fluxo de vazão foi a *Shallow Water Equations* (SWE – *Eulerian-Lagrangian Method*), que é uma série de equações utilizadas pelo modelo para calcular conservação de massa, conservação de momento, aceleração, pressão barotrópica, difusão de momento, fluxo molecular, turbulência e fricção de fundo (Brunner, 2021a). Tais cálculos são realizados célula a célula, pertencente a uma malha criada pelo próprio usuário, vinculando-a ao MDT utilizado na modelagem. Para esta malha, o HEC-RAS utiliza uma solução de volume finito como esquema, permitindo ao usuário definir a resolução da célula (ex. 1 m x 1 m ou 100 m x 100 m), criando um número limitado de células de acordo com o limite da área de estudo. As resoluções das células da malha criada no software e dos pixels do MDT não precisam ser iguais, geralmente utiliza-se resoluções menores para malha em relação ao MDT. Dessa forma, uma célula de determinada malha englobará mais de um pixel do MDT, sendo que os cálculos realizados em cada célula serão com base na média dos valores de elevações dos pixels, os quais serão computados no centro de computação da célula. Quanto menor for a célula, maior a resolução da

malha, discretizando com maiores detalhes as diferenças altimétricas do MDT, implicando em maiores tempos de processamento.

Conforme comentado anteriormente, o banco de dados necessário para a realização das modelagens hidrodinâmicas é composto pelo MDT, as informações de vazões provenientes de cinco estações fluviométricas alocadas ao longo da calha do rio Piranhas-Açu, a declividade média de cada trecho modelado e o coeficiente de rugosidade de Manning. Informações referentes à infiltração de água no solo e evapotranspiração não foram inseridas no modelo, sob a justificativa do uso dos dados primários de vazões mensurados in loco pelas estações fluviométricas. Assume-se que tais processos já ocorreram e as vazões mensuradas em cada ponto já são resultantes do volume de água remanescente do escoamento superficial em determinado momento. O fato de não inserir tais informações também justifica a não inclusão no modelo de dados de uso e cobertura do solo e dos tipos de solos, fatores que interferem nos processos de evapotranspiração e infiltração, exatamente pelo fato das vazões registradas em campo já serem resultantes da ocorrência de tais processos.

Ao MDT, foi incorporado os modelos digitais de terreno referentes aos reservatórios de Engenheiro Ávidos e Armando Ribeiro Gonçalves, localizados nos extremos à montante e à jusante, respectivamente, do trecho estudado. Tais MDTs foram obtidos no banco de dados de reservatórios do Semiárido Brasileiro pertencente à ANA, denominado Dados de Cota x Área x Volume dos Açudes do Semiárido, disponíveis gratuitamente.

Como as vazões registradas in loco pelas estações fluviométricas já são resultantes da influência de tais reservatórios e barragens correspondentes, não foi necessária a inserção de dados referentes às estruturas das barragens.

Assim, na sequência, necessita-se realizar a calibração do modelo. Com base nos eventos com ocorrência de vazões expressivas, identificados a partir das séries históricas das estações fluviométricas em abril de 1985 e 2008, foi realizada uma comparação entre os resultados do modelo hidrodinâmico e dos dados das cotas registradas in loco pelas estações.

As cotas resultantes do modelo foram mensuradas nos mesmos pontos em que estão localizadas as estações fluviométricas. A partir da comparação entre as cotas registradas em campo com as resultantes do modelo, foram encontradas as diferenças de cotas nesses pontos. A única estação em que não foi utilizada os

eventos de 1985 e 2008 para o processo de calibração foi a de Jucurutu, pois a mesma iniciou o monitoramento em 2009. Assim, utilizou-se o evento com maior vazão registrado por esta estação, em abril de 2020.

Por fim, com a modelagem hidrológica finalizada, será possível identificar e analisar possíveis impactos que a liberação da vazão poderá causar na calha do rio. A partir desses resultados, poderão ser indicadas possíveis medidas mitigadoras para minimizar impactos adversos e garantir a estabilidade do canal fluvial.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo envolvem a aplicação dos dados geoespaciais adquiridos por meio de levantamentos batimétricos, aerofotogramétricos e LiDAR, que foram utilizados para a confecção da base cartográfica e, posteriormente, para a modelagem hidrológica do rio Piranhas-Açu.

5.1 Base cartográfica

Assim, previamente à execução dos levantamentos de cobertura aerofotogramétrica, perfilamento a laser e batimetria, fez-se necessário implantar uma rede geodésica na região de estudo. Destaca-se que, para desenvolvimento da pesquisa, foi utilizado como referencial planimétrico o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) e como referencial altimétrico o datum de Imbituba.

Para realização dos levantamentos, fez-se necessário utilizar estações de referência ativa e passiva. Assim, foram empregadas, respectivamente, estações da RBMC e estações SAT/RN do IBGE. Estas compõem a Rede de Apoio Básico.

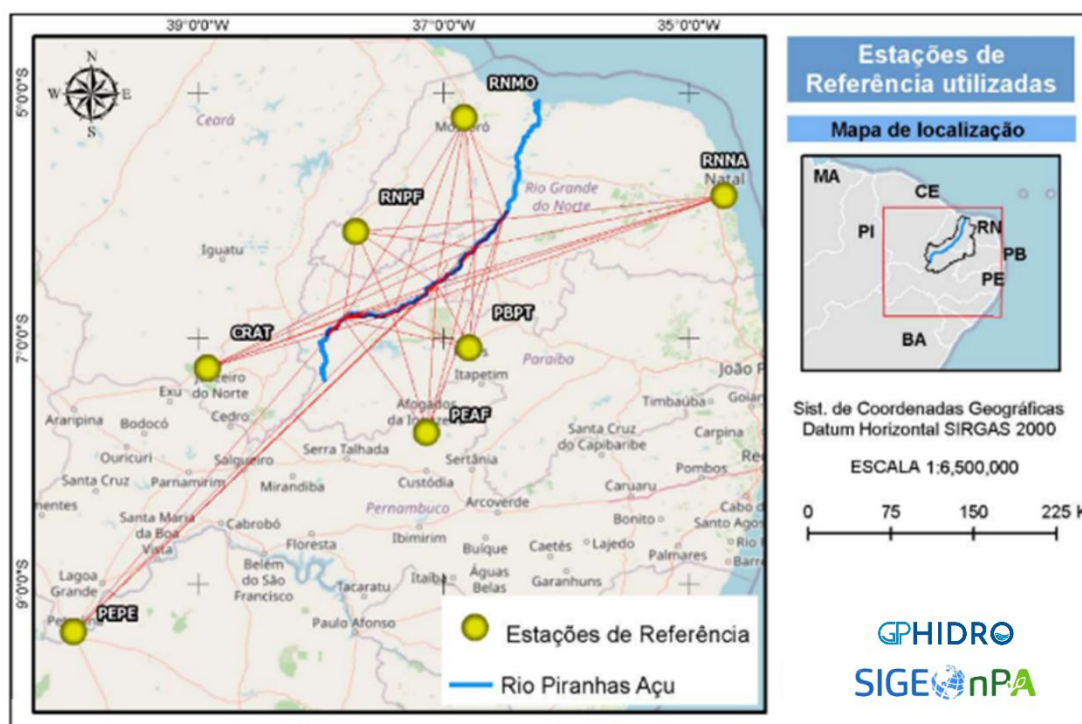
As estações da rede ativa (Tabela 2), ilustradas na Figura 7, foram utilizadas na determinação das coordenadas dos vértices implantados na área de estudo, denominados Pontos de Apoio (PAs) (Tabela 3). Estes foram distribuídos estrategicamente, conforme Figura 8, para servirem como referência aos pontos de Apoio Suplementar. Considerou-se, também, a facilidade de acesso, a segurança e a geometria do local.

Tabela 2 – Coordenadas das estações de referência da rede ativa.

Vértice	Fuso	Sistema de Referência SIRGAS 2000,4		
		Coordenadas UTM		Altitude Geométrica (m)
		Este (m)	Norte (m)	
CRAT	-24	454119,207	9199917,892	436,051
PBPT	-24	689275,712	9217623,257	257,727
PEAF	-24	689275,712	9141536,436	533,016
PEPE	-24	334616,262	8962292,665	369,11
RNMO	-24	685597,001	9424513,865	23,401
RNNA	-25	255542,604	9354429,674	45,965
RNPF	-24	587761,311	9322164,666	45,965

Fonte: A autora.

Figura 7 – Estações de referência da rede ativa.



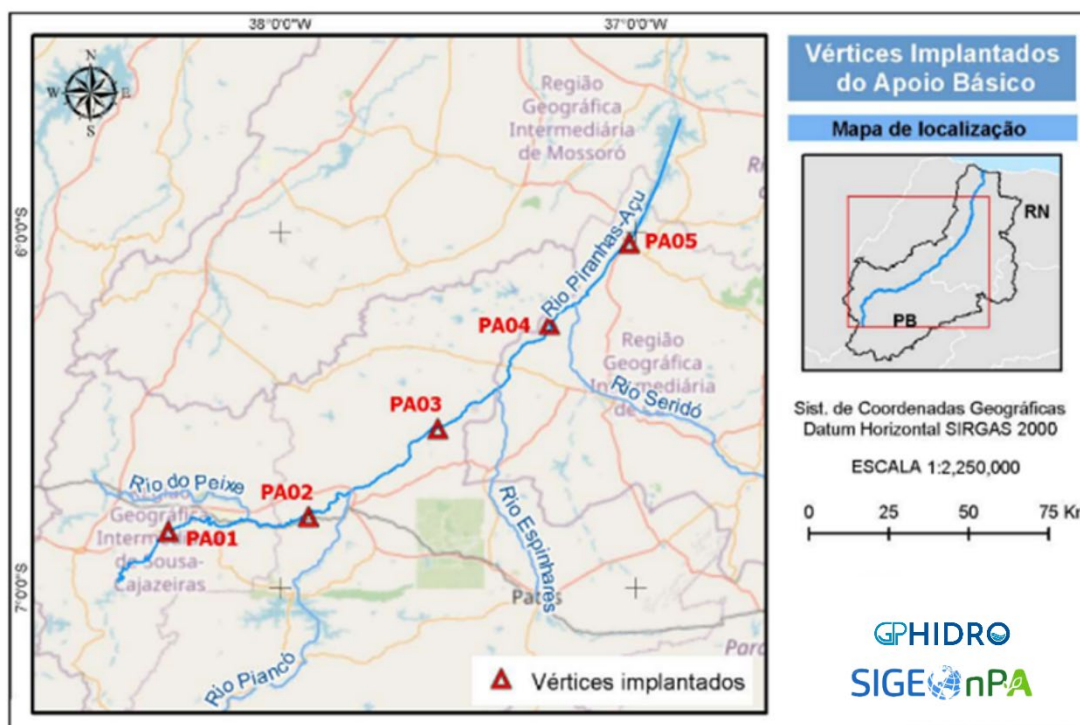
Fonte: A autora.

Tabela 3 – Coordenadas dos pontos de apoio.

Vértice	Este (m)		Norte (m)		Altitude Geométrica (m)		Altitude Normal (m)	
		σ		σ		σ		σ
PA01	575907,839	0,013	9243738,983	0,004	229,454	0,018	238,464	
PA02	619534,880	0,013	9248108,072	0,004	186,189	0,016	194,599	
PA03	659794,118	0,019	9275392,231	0,006	138,478	0,028	146,146	
PA04	694534,505	0,013	9307588,099	0,004	109,239	0,026	116,193	
PA05	719617,426	0,012	9332869,322	0,004	74,224	0,022	80,752	

Fonte: A autora.

Figura 8 – Pontos de apoio.



Fonte: A autora.

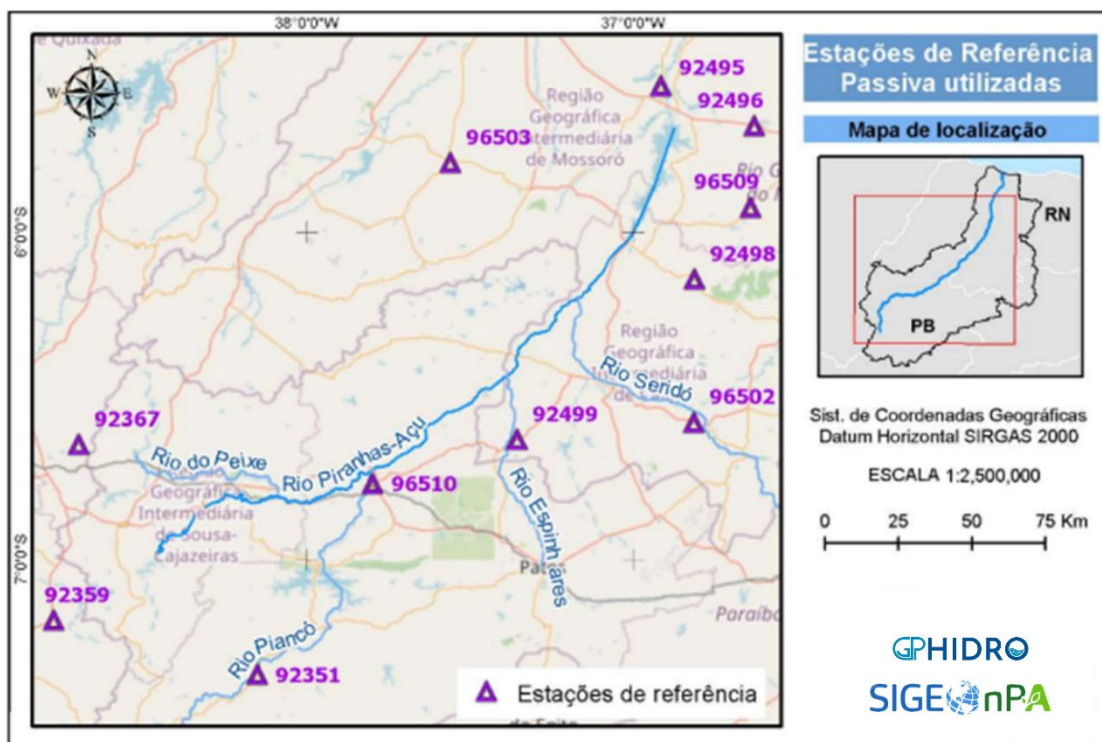
As estações da rede passiva (Tabela 4), ilustradas na Figura 9, apoiaram a confecção do MGL. Assim, para densificação dos vértices a serem reocupados (Tabela 5 e Figura 10), foram utilizadas informações de altitudes geométrica e normal apresentadas nos Relatórios de Informação das Estações Geodésicas.

Tabela 4 – Coordenadas das estações de referência da rede passiva.

Sistema de Referência SIRGAS 2000,4					
Vértice	Conexão	Coordenadas UTM		Altitude Geométrica (m)	Altitude Normal (m)
		Este (m)	Norte (m)		
92359	4331E	525027,533	9205561,193	411,414	421,215
92367	4330U	533557,821	9264939,083	268,364	278,026
92495	2407R	731034,004	9385750,587	27,390	33,874
92496	1823R	731034,004	9372125,358	127,140	133,338
92498	2409B	742266,600	9320321,483	320,930	326,485
92499	1840Z	681841,587	9320321,483	191,201	198,398
96502	1842S	741827,086	9271888,789	254,943	260,507
96503	440G	659489,655	9359924,253	150,934	158,101
96509	2411C	761339,704	9344548,520	113,866	119,681
96510	1837D	633040,581	9251532,414	179,583	187,779
92351	1883L	593844,162	9187045,997	313,073	321,790

Fonte: A autora.

Figura 9 – Estações de referência da rede passiva.



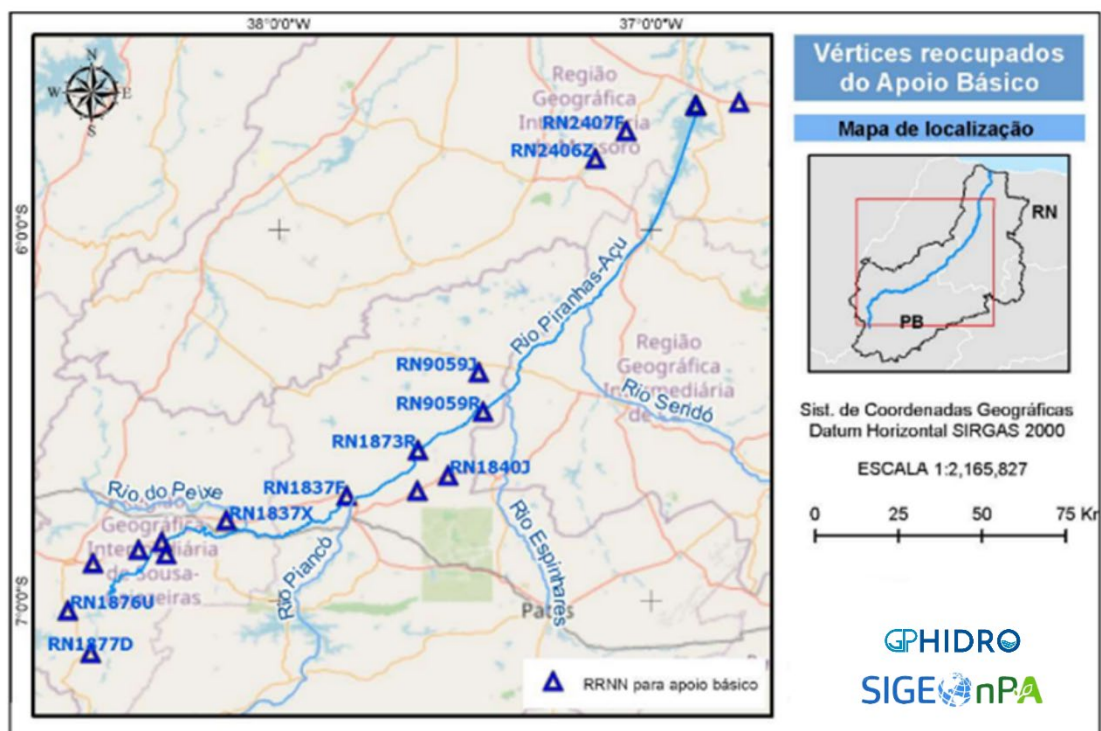
Fonte: A autora.

Tabela 5 – Coordenadas dos vértices reocupados do apoio básico.

Vértice	Sistema de Referência SIRGAS 2000,4 Coordenadas UTM		Altitude Geométrica (m)	Altitude Normal (m)
	Este (m)	Norte (m)		
RN1873R	652097,207	9270912,222	152,506	160,376
RN9059R	671349,708	9282240,515	140,604	147,967
RN1839A	555365,970	9237370,927	296,449	305,7403
RN409J	575899,785	9243733,458	229,171	238,2221
RN1879T	577100,131	9240170,756	246,75	255,7303
RN1823J	748040,837	9374020,873	70,347	76,7633
RN2622T	735229,565	9373250,662	57,254	63,7911
RN2622U	734935,357	9372996,631	55,631	62,2023
RN1840J	660872,801	9263352,183	199,708	207,3741
RN1840E	651878,836	9258751,234	193,749	201,6889
RN9059J	670118,680	9294013,177	160,101	167,5909
RN1837X	595109,099	9250154,675	214,858	223,6701
RN1837F	630881,229	9257454,377	215,069	223,2923

Fonte: A autora.

Figura 10 – Vértices reocupados do apoio básico.



Fonte: A autora.

As monografias dos marcos do Apoio Básico são apresentadas no Anexo I e os Relatórios das Estações Geodésicas são apresentadas no Anexo II.

Além disso, para complementar a rede de apoio, considerou-se informações de marcos geodésicos da ANA presentes ao entorno dos açudes da área de estudo (Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Armando Ribeiro), conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Coordenadas dos marcos existentes.

Vértice	Este (m)	Norte (m)	Altitude Geométrica (m)	Altitude Ortométrica Nivelamento (m)	Altitude Normal - Ajuste 2018 (m)
M01–RN2407P01	722654,986	9376758,345	106,399	112,635	112,885
M02	729285,725	9375144,503	45,221	51,474	51,722
M05	733635,165	9372914,875	55,847	62,211	62,459
M06–RN1823E03	741777,995	9371746,23	79,289	85,483	85,73
M7–1823E05	742861,62	9366206,171	64,129	70,34	70,587
M08–RN1823E09	734487,892	9359502,498	77,25	83,512	83,759
M09	734890,732	9352083,129	70,911	77,154	77,401
M10–RN2408L06	736819,947	9343280,589	92,718	98,756	99,003
M11	726317,623	9341237,856	49,857	56,062	56,309
M13–2408P03	719329,034	9333106,238	58,661	64,949	65,197

Vértice	Este (m)	Norte (m)	Altitude Geométrica (m)	Altitude Ortométrica Nivelamento (m)	Altitude Normal - Ajuste 2018 (m)
M14-2408P10	708295,583	9347838,133	129,195	135,641	135,889
M16-RN2407P03	718422,202	9373717,126	92,222	98,494	98,744
RN1-RE-ARG	735210,754	9373164,5	55,936	62,215	62,463
RN1-RE-MEN	728911,235	9375830,497	44,02	50,335	50,583
RN2406Z	705172,294	9357437,024	89,142	95,633	95,883
RN2407F	714253,632	9365600,641	72,667	79,064	79,314
M01-M1876U-06	560144,831	9227708,398	316,13	324,998	325,246
M03-1876U-08	564659,586	9226634,962	321,373	330,172	330,42
M04-1876U-12	567410,379	9220895,041	340,201	348,98	349,228
M7-M1876U-03	555446,017	9223275,042	348,811	357,757	358,005
M8-M1876U-04	555804,094	9225465,431	337,112	346,038	346,286
RN02-REG-ENG	560457,842	9227765,198	316,239	325,103	325,351
RN1876U	547847,8	9223389,272	337,079	346,104	346,353
RN1877D	554728,979	9210750,237	345,586	354,561	354,809
M02-1879T-03	575913,746	9243331,769	246,18	254,939	255,187
M04-1879T-01	577656,059	9242779,28	254,549	263,267	263,515
M08-1879V-02	574278,923	9239459,915	272,381	281,149	281,397
M409J-02	571271,671	9243291,476	295,19	303,992	304,24
M1879V-01	576373,736	9238254,714	270,843	279,551	279,799
RN1-REG-SG	576253,412	9243238,793	246,343	255,093	255,341
RN1838T	568861,099	9241539,065	273,733	282,548	282,796
AUX-1879V	574815,99	9235837,355	275,27	283,993	284,241
M409J-01	574157,723	9243543,804	266,81	275,58	275,828

Fonte: A autora.

O Apoio Suplementar consistiu na determinação dos pontos de controle utilizados na etapa de aerotriangulação, além dos pontos de checagem para análise posicional dos dados cartográficos (Anexo III).

Para amarração dos modelos fotogramétricos, foi necessária a identificação de pontos nas imagens, previamente medidos no terreno. Destaca-se que estes foram escolhidos com cautela, em locais preferencialmente planos e com espaçamentos que atendessem às especificações para a escala do mapeamento, necessários à orientação dos estéreos-modelos.

No processamento foram analisadas as precisões de linhas de base obtidas. Após o ajustamento das observações, como fator limitante, foram aceitos apenas os valores de precisões pontuais não superiores a 10 centímetros, tanto na resultante das componentes horizontais quanto na altura geométrica.

Na sequência, foi possível elaborar o MGL. Para sua confecção e posterior aferição, foram utilizados, respectivamente, 44 e 13 vértices do apoio básico, totalizando 57 pontos.

Assim, após calculadas as ondulações geoidais de cada um dos 44 pontos, conforme Tabela 7, e realizada a interpolação dos valores, foi possível confeccionar o modelo geoidal da região estudada (Figura 11).

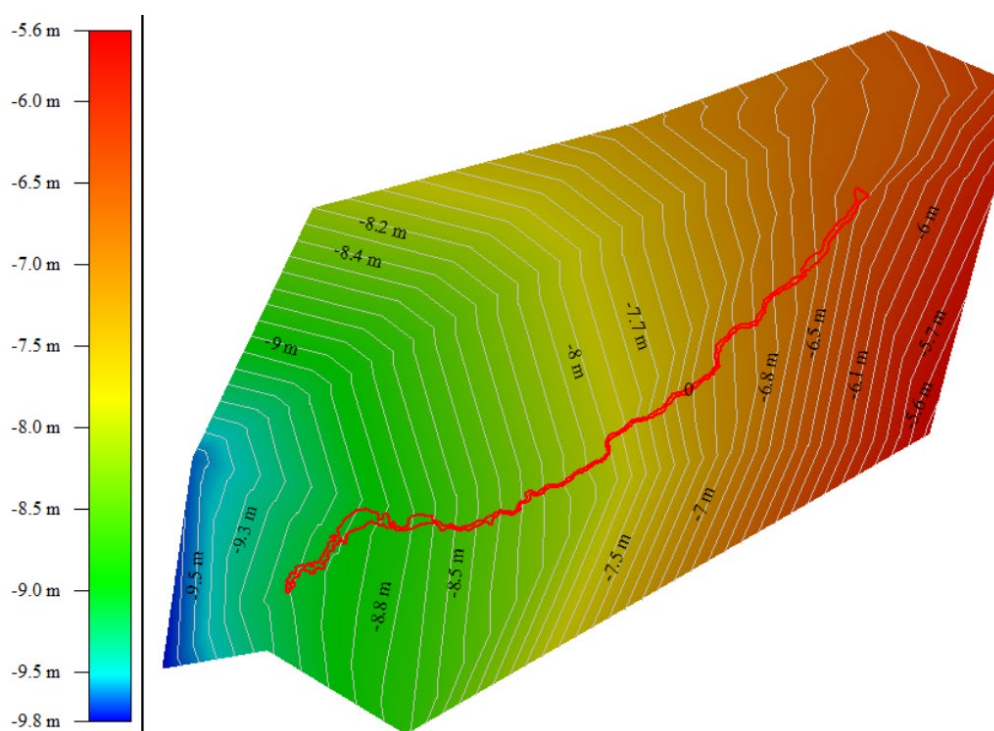
Tabela 7 – Vértices de referência utilizados para confecção do modelo geoidal local.

Vértice	Este (m)	Norte (m)	Ondulação Geoidal real (m)
92359	525027,000	9205561,000	-9,801
92367	533558,000	9264939,000	-9,662
92495	731034,000	9385751,000	-6,484
92496	762716,000	9372125,000	-6,198
92498	681842,000	9266306,000	-7,197
92499	741827,000	9271889,000	-5,564
96502	659490,000	9359924,000	-7,167
96503	761340,000	9344549,000	-5,815
96509	633041,000	9251532,000	-8,196
96510	593844,000	9187046,000	-8,717
92351	567576,000	9335627,000	-8,103
M06-RN1823E03	741778,000	9371746,000	-6,441
M7-1823E05	742862,000	9366206,000	-6,458
M08-RN1823E09	734488,000	9359502,000	-6,509
M09	734891,000	9352083,000	-6,490
M10-RN2408L06	736820,000	9343281,000	-6,285
M11	726318,000	9341238,000	-6,452
M13-2408P03	719329,000	9333106,000	-6,536
M14-2408P10	708296,000	9347838,000	-6,694
RN1-RE-MEN	728911,000	9375830,000	-6,563
RN2406Z	705172,000	9357437,000	-6,741
RN2407F	714254,000	9365601,000	-6,647
M01-M1876U-06	560145,000	9227708,000	-9,116
M03-1876U-08	564660,000	9226635,000	-9,047
M04-1876U-12	567410,000	9220895,000	-9,027
M7-M1876U-03	555446,000	9223275,000	-9,194
M8-M1876U-04	555804,000	9225465,000	-9,174
RN02-REG-ENG	560458,000	9227765,000	-9,112
RN1876U	547848,000	9223389,000	-9,274
RN1877D	554729,000	9210750,000	-9,223
M02-1879T-03	575914,000	9243332,000	-9,007
M04-1879T-01	577656,000	9242779,000	-8,966
M08-1879V-02	574279,000	9239460,000	-9,016

Vértice	Este (m)	Norte (m)	Ondulação Geoidal real (m)
M409J-02	571272,000	9243291,000	-9,050
M1879V-01	576374,000	9238255,000	-8,956
RN1-REG-SG	576253,000	9243239,000	-8,998
RN1838T	568861,000	9241539,000	-9,063
AUX-1879V	574816,000	9235837,000	-8,971
M409J-01	574158,000	9243544,000	-9,018
RN1873R	652097,000	9270912,000	-7,870
RN9059R	671350,000	9282241,000	-7,363
RN2622T	735230,000	9373251,000	-6,537
RN1840E	651879,000	9258751,000	-7,940
RN1837X	595109,000	9250155,000	-8,812

Fonte: A autora.

Figura 11 – Modelo geoidal.



Fonte: A autora.

Posteriormente, o modelo foi validado com os 13 vértices apontados anteriormente, por meio da comparação da ondulação geoidal real, obtida pela diferença entre as altitudes geométrica e normal, com a ondulação geoidal da superfície confeccionada. A Tabela 8 apresenta os vértices do apoio básico utilizados para essa validação, bem como os resultados encontrados.

Tabela 8 – Vértices de referência utilizados para aferição do modelo geoidal local.

Sistema de Referência SIRGAS 2000,4						
Vértice	Este (m)	Norte (m)	N (Real)	N (MGL 2021)	ΔN (Real x MGL 2021)	
M01–RN2407P01	722655	9376758,3	-6,486	-6,602	0,116	
M02	729285,7	9375144,5	-6,501	-6,562	0,061	
M05	733635,2	9372914,9	-6,612	-6,545	-0,067	
M16–RN2407P03	718422,2	9373717,1	-6,522	-6,652	0,13	
RN1–RE–ARG	735210,8	9373164,5	-6,527	-6,537	0,01	
RN1839A	555366	9237370,9	-9,291	-9,233	-0,058	
RN409J	575899,8	9243733,5	-9,051	-9,01	-0,041	
RN1879T	577100,1	9240170,8	-8,98	-8,958	-0,022	
RN1823J	748040,8	9374020,9	-6,416	-6,356	-0,06	
RN2622U	734935,4	9372996,6	-6,571	-6,539	-0,032	
RN1840J	660872,8	9263352,2	-7,666	-7,705	0,039	
RN9059J	670118,7	9294013,2	-7,49	-7,482	-0,008	
RN1837F	630881,2	9257454,4	-8,223	-8,226	0,003	
				Média	0,005	
				Mediana	-0,008	
				Desvio Padrão	0,065	
				Erro Médio Quadrático	0,004	
				Máxima	0,130	
				Mínima	-0,067	

Fonte: A autora.

Os valores obtidos foram satisfatórios e estão dentro das precisões esperadas.

Na sequência, a cobertura aérea e o perfilamento a laser foram executados, conforme descrito anteriormente. Para o processamento digital das imagens, considerou-se a fusão dos dados brutos de cada imagem em uma única imagem colorida RGB. Inclui a realização de ajustes de radiometria, equalização e níveis de contraste, a fim de se obter o melhor histograma para cada imagem. Em seguida, inicia-se o tratamento dos dados, utilizando técnicas modernas foram realizados os processos de filtragem, suavização, equalização, garantindo o padrão de qualidade da imagem final.

Para o processamento dos dados laser, duas etapas se fizeram necessárias: o processamento da trajetória e a geração da malha de pontos. Na primeira fase foi analisada a qualidade do voo e do processamento. Para tal, foram gerados relatórios gráficos, onde foram apresentados alguns dados, tais como: Erro Médio Quadrático (RMS), direcionamento e sentido do voo, desvio padrão das componentes GNSS,

distância da base e perfil do voo durante o levantamento. Estes apresentaram valor satisfatório e, assim, o voo não precisou ser refeito. Por fim, foi realizado um novo processamento com o objetivo de determinar a nuvem de pontos no sistema de coordenadas que foi obtido no GNSS.

Na sequência, realizou-se as etapas de aerotriangulação e estéreo restituição planialtimétrica que objetivam, respectivamente, calcular os parâmetros de orientação para as imagens e a extração das feições planimétricas e do relevo da região mapeada, possibilitando a elaboração de produtos na escala 1:2.000.

As feições restituídas foram apresentadas em total conformidade com os atributos e representações gráficas das Normas Técnicas vigentes. O Controle de Qualidade da Estéreo Restituição Planialtimétrica atendeu aos critérios preestabelecidos, como continuidade de elementos gráficos, fechamento de polígonos, fechamento topológico, entre outros.

Realizou-se, então, o processo de ortorretificação para correção das distorções presentes nas fotografias aéreas, incluindo o deslocamento devido às variações do relevo. Na sequência, com a realização da mosaicagem e do processamento das imagens, a ortofoto foi gerada (Apêndice A).

Por fim, para elaboração do MDT, classificou-se a nuvem de pontos bruta do perfilamento a laser (Apêndice B). Durante a fase de processamento do MDT foram verificadas as precisões atingidas no perfilamento, comparando com os pontos coletados no Apoio de Campo.

No que tange os elementos de qualidade observados, tem-se para a Acurácia Posicional: enquadramento no PEC Classe A, para a escala 1:2.000; Completude: Resolução espacial de 0,50 m gerados a partir de 4 pontos/m²; Consistência Lógica: arquivos do tipo matricial com grade regular; e Consistência: arquivos enquadrados de acordo com o previsto na articulação sugerida para a escala 1:2.000.

Por fim, posterior à elaboração do MDT, foram geradas as curvas de nível.

Com o intuito de complementar e detalhar as informações sobre a profundidade e características do leito do corpo d'água em estudo, a campanha batimétrica foi executada. Conforme mencionado anteriormente, o levantamento foi realizado com ecobatímetro monofeixe e, em locais em que a navegação não era possível, com GNSS RTK.

O processamento dos dados coletados com ecobatímetro foi iniciado com a verificação da ocorrência de feriados, garantindo que todo o planejamento fosse

cumprido. Em seguida, de posse das linhas batimétricas executadas, realizou-se a análise individual de cada uma, a fim de eliminar profundidades espúrias. Para concluir o processamento de cada seção batimétrica, os ecogramas digitais foram consultados. Após a edição dos dados, o arquivo *.XYZ foi gerado.

O processamento das seções topobatimétricas não se fez necessário, uma vez que os pontos foram coletados com tecnologia RTK e, assim, recebem correção em tempo real.

De posse dos dados do levantamento da área seca e da área molhada, foi possível realizar a integração dos dados. Primeiramente, para caracterização integral da calha do rio, as regiões entre as seções batimétricas foram interpoladas. Para a parte seca considerou-se a malha de pontos obtidas pelo perfilamento a laser, assegurando a identificação precisa da delimitação dos cursos d'água e da morfologia local.

Após análise, validação e preparação dos insumos, a interpolação foi realizada, consolidando todas as informações, e gerando uma superfície contínua e uniforme (Apêndice C).

5.2 Estudos e análises hidrológicas

Conforme mencionado anteriormente, os estudos hidrológicos foram iniciados com os cálculos de vazão. Assim, apresenta-se na Tabela 9 os resultados do panorama estudado, considerando a liberação da vazão do PISF acrescido de um TR de 5 anos filtrado para o período de estiagem.

Tabela 9 – Vazões resultantes.

Estações Fluviométricas	Vazão (m ³ /s)
Várzea Grande	57,2
São Domingos do Pombal	79,7
Sítio Vassouras	137,4
Jardim de Piranhas	214,7
Jucurutu	94,2

Fonte: A autora.

Em seguida, foram analisadas as declividades médias dos trechos (Tabela 10) e o coeficiente de rugosidade de Manning (Tabela 11), conforme indicado no item 4.2.2.

Tabela 10 - Declividade média dos trechos pertencentes à calha do Piranhas-Açu.

Trecho	Declividade média (m/km)
Engenheiro Ávidos a São Gonçalo	0.00143
São Gonçalo ao Rio do Peixe	0.00095
Rio do Peixe ao Rio Piancó	0.00083
Rio Piancó ao Rio Espinhares	0.00069
Rio Espinhares ao Rio Seridó	0.00079
Seridó até Armando Ribeiro	0.00146

Fonte: A autora.

Tabela 11 - Coeficiente de rugosidade de Manning de acordo com as condições ambientais da calha do Piranhas-açu.

Trecho	Condições Ambientais	Valor de Manning
CPA	Calha com meandros, bancos de areia, rochas e vegetação, em condições regulares	0,040
CPB	Calha com poucos meandros, trechos retilíneos, com bancos de areias e vegetação, em condições regulares	0,035
CPC	Calha com meandros, bancos de areia, rochas e vegetação, em condições ruins	0,060
CPD/CPE	Calha com meandros, margens espraiadas, com bancos de areia e presença de vegetação, em condições regulares	0,125

Fonte: A autora.

Em seguida, foi possível proceder com a confecção do modelo no software HEC-RAS. O resultado está apresentado no Apêndice D.

A comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico, referentes ao nível da água atingido pela mancha de inundação das vazões máximas registradas pelas estações fluviométricas e o nível da água registrado por estas mesmas estações na mesma data de ocorrência de tais eventos, mostrou que as diferenças de nível da água variaram entre 18 cm em Várzea Grande e 79 cm em São Domingos do Pombal (Tabela 12). A diferença média foi de aproximadamente 50 cm.

Tabela 12 - Diferença de nível entre os resultados do modelo e o registro de campo nas estações.

Estação Fluviométrica	Nível (m)			Diferença de Nível (m)	
	Registrado [R] (1985)	Registrado [R] (2008)	Modelo [M]	M - R (1985)	M - R (2008)
Várzea Grande	4,12	4,00	3,82	-0,30	-0,18
São Domingos do Pombal	-	5,89	5,1	-	-0,79
Sítio Vassouras	8,95	8,90	8,4	-0,55	-0,50
Jardim de Piranhas	7,56	7,75	7,05	-0,51	-0,70
Jucurutu*	-	5,80	5,63	-	-0,17
Diferença Média (m)				-0,45	-0,47

*Registro de cota de abril de 2020.

Fonte: A autora.

Dados observados referentes ao nível d'água atingidos por manchas de inundação são considerados os mais acurados para calibração de modelos hidrodinâmicos. No entanto, até mesmo tais dados possuem erros inerentes ao seu levantamento, de aproximadamente 30 cm. Além disso, outros fatores podem gerar inconsistências, como eventos de inundações que atinjam as estações e ocasionam o comprometimento ou perda de registros dos eventos; diferenças entre o datum utilizado no modelo e os utilizados como referência para as estações fluviométricas; entre outras situações (Brunner, 2021a). Logo, considerando os resultados satisfatórios, é possível analisar o impacto das vazões de regularização na região que receberá as águas do PISF.

5.3 Impacto das vazões de regularização e análise da base de dados

As simulações no modelo mostraram que a liberação da vazão máxima operacional do PISF para a calha do rio Piranhas-Açu, de 53,48 m³/s, acrescida das vazões recorrentes ao longo do trecho no período de estiagem (TR de 5 anos filtrado para o período de seca) não tendem a provocar inundações expressivas das margens, nem causar impactos socioeconômicos devido a inundações.

No entanto, as passagens molhadas, na situação atual que se encontram, poderão ficar submersas por mais tempo do que já normalmente ocorre. Essa situação será influenciada pela época de liberação das vazões do PISF, além da sua magnitude.

Considerando o cenário aqui descrito, as travessias do trecho se tornarão inoperantes no período de liberação e, assim, para solucionar esse problema, uma medida a ser tomada é a readequação dessas estruturas. Reitera-se, entretanto, que

grande parte delas já são inoperantes em determinado período do ano – especialmente o de cheia – e, considerando os acessos alternativos ao entorno das travessias, não haveria grandes prejuízos a população ou às atividades econômicas.

Ademais, outra alternativa seria liberar as vazões gradualmente em períodos de cheia, a fim de reduzir o tempo de inoperação das travessias e, ainda, evitar perdas excessivas das águas do PISF devido à evaporação uma vez que os rios receptores já estão com vazões prévias e há maior ocorrência de nebulosidade, mitigando a incidência de insolação nos corpos d'águas.

Destaca-se, também, o alagamento de algumas regiões nos primeiros trechos, mais especificamente entre as barragens de Engenheiro Ávidos e São Gonçalo. A principal causa de extravasamento nestes locais é a dimensão da calha, com baixa profundidade e largura. Entretanto, não se faz necessário nenhum tipo de intervenção, uma vez que essas regiões já são naturalmente inundáveis em períodos de cheias e, por isso, são denominadas planícies de inundação.

No que diz respeito à base de dados utilizada, a integração de dados LiDAR e batimétricos se mostrou eficaz, haja visto os resultados encontrados e a precisão do modelo hidrológico gerado.

Além disso, é importante destacar que, além da maior precisão e resolução do modelo da área seca, obtido por meio do perfilamento a laser, é essencial possuir dados da parte molhada para evitar subestimativa das profundidades.

Isto pois, modelos digitais gratuitos (como SRTM) ou modelos gerados apenas a partir de voos aerofotogramétricos apresentam limitações quanto ao levantamento das informações altimétricas, visto que a calha do rio/corpo d'água em estudo poderá estar parcialmente cheia e considerará a superfície do espelho d'água como seu fundo. Esta subestimativa depende da cota do nível d'água em relação ao fundo da calha, que, nesta pesquisa, varia conforme o trecho do rio.

Nesse contexto, poderá haver superestimativas das áreas alagadas e, conseqüentemente, maiores esforços para mitigar um problema que poderá não ser real.

Outra problemática da utilização de dados menos precisos está relacionada com a presença de vegetação na área de estudo, levando a distorções nos valores de altimetria, que atribui elevações não condizentes com o terreno. Esse problema é sanado com a utilização do LiDAR, uma vez que uma característica deste sistema é o registro de múltiplos retornos que, ao serem analisados de acordo com a intensidade

do sinal, permitem determinar e classificar o objeto em solo, sua forma e altura com base na nuvem de pontos gerada.

Dessa forma, ressalta-se a importância da escolha adequada da base de dados para estudos hidrológicos, especialmente em cenários que envolvem a avaliação de impactos de intervenções hídricas. A combinação de dados LiDAR e batimétricos possibilitou a obtenção de um modelo mais representativo da morfologia do rio, reduzindo incertezas associadas a modelos altimétricos de menor resolução. Assim, a integração desses dados se mostra essencial para análises mais precisas, contribuindo para a tomada de decisões embasadas e para o planejamento de medidas mitigadoras mais eficazes.

6. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma abordagem detalhada para a análise dos impactos decorrentes da liberação da vazão máxima operacional do PISF no rio Piranhas-Açu, com base na integração de dados de alta precisão e de modelagens hidrológicas. A base cartográfica foi gerada a partir da integração de informações provenientes de levantamentos aerofotogramétricos, laser e batimétricos. A modelagem hidrológica, por sua vez, incorporou a variação das vazões ao longo do trecho estudado, considerando tanto a vazão liberada pelo PISF quanto o ajuste das séries históricas fluviométricas. Esses resultados foram essenciais para avaliar as alterações no comportamento hidrológico do rio e para simular diferentes cenários de escoamento.

A integração de dados LiDAR e batimétricos demonstrou-se uma estratégia eficaz para a análise da dinâmica hídrica na região. Essa metodologia permitiu representar com maior precisão a morfologia do rio, reduzindo incertezas associadas a modelos de menor resolução. Além disso, a combinação desses dados para a modelagem hidrológica possibilitou uma avaliação mais detalhada dos impactos da liberação de vazão, contribuindo para um melhor entendimento dos processos hidrológicos locais. Assim, este estudo constitui um avanço significativo para o aprimoramento das estratégias de gestão hídrica em regiões semiáridas e poderá servir como referência para futuros projetos de infraestrutura hídrica no Brasil.

No âmbito do PISF, recomenda-se a realização de novos estudos que avaliem diferentes cenários de liberação da vazão máxima operacional, considerando aspectos como a sazonalidade e os possíveis impactos sobre estruturas existentes, a fim de otimizar o uso dos recursos hídricos e minimizar perdas por evaporação. Além disso, investigações futuras poderiam explorar estratégias complementares para a mitigação dos impactos identificados, incluindo alternativas para a readequação das passagens molhadas e a definição de períodos mais adequados para a liberação das vazões.

Dessa forma, os resultados deste trabalho reforçam a importância da escolha de bases de dados adequadas para estudos hidrológicos e demonstram como a integração de diferentes técnicas e fontes de informação pode contribuir para análises mais precisas e embasadas, auxiliando na tomada de decisões e no planejamento de intervenções hídricas de forma sustentável e eficiente.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA (AESAs). **Comitê de Bacias Piranhas-Açu**. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/comite-de-bacias/piranhas-acu/>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. 2019. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. 2017. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/relatorio-conjuntura-2017.pdf>
- BALTSAVIAS, E. P. **A comparison between photogrammetry and laser scanning**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 54, n. 2-3, p. 83-94, 1999.
- BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a LASER: comparação com métodos Fotogramétricos**. In.: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, Porto Alegre, 2001.
- BRASIL. Decreto-lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. **Política Nacional de Segurança de Barragens**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 de set. 2010. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/12334.htm>
- BRITO, F. B. **Conflitos pelo Acesso e Uso da Água: Integração do Rio São Francisco com a Paraíba (Eixo Leste)**. 359f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- BRUNNER, G.W. HEC-RAS: **River System Analysis 2D Modeling User's Manual**. Version 6.0 Beta. US Army Corps of Engineers, Institute of Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. 2021a. 289 p.
- BRUNNER, G.W. HEC-RAS: **River System Analysis User's Manual**. Version 6.0. US Army Corps of Engineers, Institute of Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. 2021b. 703 p.
- CASTRO, C. N. **Transposição do rio São Francisco: Análise de oportunidade do projeto**. Texto para Discussão, 2011.
- FERREIRA, I. O.; EMILIANO, P. C.; DOS SANTOS, A. DE P.; MEDEIROS, N. DAS G.; DE OLIVEIRA, J. C. **Proposição de um Estimador Pontual para Incerteza Vertical de Levantamentos Hidrográficos**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 71, n. 1, p. 1-30, 2019.

FERREIRA, I. O.; [CALIJURI, M. L.](#); TEIXEIRA, V. G. [...] **Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental do Rio Piranhas-Açu: Ações Emergenciais**. Editora UFV, 2021 (Relatórios de estudos).

FERREIRA, I. O.; [CALIJURI, M. L.](#); TEIXEIRA, V. G. [...] **Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental do Rio Piranhas-Açu: Proposições de Soluções de Engenharia. Volume 1 - Dados Cartográficos e Hidrológicos e Diagnóstico Socioeconômico e Ambiental**. Editora UFV, 2022 (Relatórios de estudos).

GALVANIN, E. A. S.; POZ, A. P. D. **Sistema LiDAR e Métodos de Interpolação de Dados**. Revista de Geografia (UFPE), [s.l.], v. 30, n. 01, p.91-102, 2013.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Manual on Hydrography**. Mônaco: International Hydrographic Bureau, p. 540, 2005.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication No 44 – 6o**. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2020.

KUHNEN, B. S. **Método e técnica para obtenção da curva cota x área x volume (CAV)**. 2020.

LUCAS, Edmundo Wallace Monteiro et al. **Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu-Pará**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 24, p. 308-322, 2009.

MALEIKA, W. **The influence of the grid resolution on the accuracy of the digital terrain model used in seabed modeling**. Marine Geophysical Research, v. 36, n. 1, p. 35-44, 2015.

MATIAS, L. **Como Funciona o Sonar: Medição da Velocidade do Som na Água**. Centro de Geofísica, Universidade de Lisboa. Portugal. 2010.

MINHONI, R. T. A., BRITO, G. M., & DE AZEVEDO, R. F. **Uso De Ecobatímetro Monofeixe Na Determinação Da Curva Cota X Área X Volume Do Reservatório Da PCH Pipoca–Minas Gerais–Brasil**. IRRIGA, 22(1), 87-100, 2017.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MIDR). 2024. **Projeto de Integração do Rio São Francisco: o Projeto**. Governo Federal. Disponível em: < <https://www.gov.br/mdr/ptbr/assuntos/segurancahidrica/projeto-sao-francisco/o-projeto>>.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). (2019). **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Recuperado de: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-seguranca-hidrica-pnsh>

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). 2021. **Projeto de Integração do Rio São Francisco: o Projeto**. Governo Federal. Disponível em:<
<https://www.gov.br/mdr/ptbr/assuntos/segurancahidrica/projeto-sao-francisco/o-projeto>>.

NEVES, Y. T. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica acoplada 1D/2D utilizando imagens de perfilamento a laser**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

OLIVEIRA, A. F., & SILVEIRA, R. P. (2018). **Água, saneamento e saúde no Brasil: uma análise a partir da Pesquisa Nacional de Saúde**. 2013. *Ciência & Saúde Coletiva*, 23(7), 2399-2410.

OLIVEIRA, F. F., & LIMA, J. E. (2019). **Secas e políticas públicas no Brasil: Uma revisão de literatura sobre o semiárido nordestino**. *Revista de Economia e Agronegócio*, 17(3), 339-367.

PETRELLA, R. **O Manifesto da Água**. Editora Vozes. 2002.

PIRES, A. P. N. **Estrutura e objetivos da transposição do rio São Francisco: versões de uma mesma história**. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, v. 23, n. 1, p. 182-197, 2019

PORTO, R. L. L.; AZEVEDO, L. G. T. **Sistemas de Suporte A Decisões Aplicadas a Problemas de Recursos Hídricos**. In: *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. Revisada. São Carlos: EESC – USP, 2006. 540 p.

SANTOS, F. C. M.; FERREIRA, I. O.; ANDRADE, L. C. DE; TEIXEIRA, V. G. **Avaliação Qualitativa e Quantitativa da Ferramenta de Pré-seleção Sort para Dados Monofeixe e Multifeixe**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 71, n. 4, p. 1064-1088, 2019.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **Hidrographic Surveying**. Engineer Manual No 1110-2-1003. Department of the Army. Washington, D. C., 30 Nov. 2013.

VITOR, G. A. et al. **Saúde e saneamento no Brasil: uma revisão narrativa sobre a associação das condições de saneamento básico com as doenças de veiculação hídrica**. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 15, p. e521101522913-e521101522913, 2021.

WEHR, A.; LOHR, U. **Airborne laser scanning-an introduction and overview**. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 54, n. 2-3, p. 68-82, 1999.

APÊNDICES

Para visualizar os Apêndices, favor acessar:

https://drive.google.com/drive/folders/1Lq3yl9rvw34QgXkuWOa-E6Nziu53gXLB?usp=drive_link

ANEXOS

Para visualizar os Anexos, favor acessar:

[https://drive.google.com/drive/folders/1DQJEjFvqwVn5NQRwCGHbocg5U2BO2Zf?
usp=drive_link](https://drive.google.com/drive/folders/1DQJEjFvqwVn5NQRwCGHbocg5U2BO2Zf?usp=drive_link)