



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

**Otimização de traçados de adutoras por meio de modelos de
decisão multicritério baseado em SIG e aplicação de um
algoritmo de busca geométrica**

Leon Mortari

Dissertação de Mestrado

Nº 236

Brasília, Julho de 2025

LEON MORTARI

**OTIMIZAÇÃO DE TRAÇADOS DE ADUTORAS POR MEIO DE
MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO BASEADO EM SIG E
APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO DE BUSCA GEOMÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade Brasília (PPGGAG – UnB), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Geoprocessamento e Análise Ambiental.

Área de Concentração: Geoprocessamento e Análise Ambiental

Linha de Pesquisa: Avaliação de Dados e Técnicas de Senciamento Remoto, Geoprocessamento, Cartografia e Geodésia

Orientadora: Julia Barbosa Curto Ma

Coorientador: Henrique Llacer Roig

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Julia Barbosa Curto Ma (IG - UnB)

Prof^ª. Dr^ª. Rejane Ennes Cicerelli (IG - UnB)

Prof. Dr. Francisco de Assis Dourado da Silva (FGEL - UERJ)

Brasília – DF

2025

MM887om Mortari, Leon
Mortari / Leon Mortari; orientador Julia Barbosa Curto
Ma; co-orientador Henrique Llacer Roig . Brasilia, 2025.
90 p.

Dissertação(Mestrado em Geociências Aplicadas)
Universidade de Brasília, 2025.

1. Otimização de rotas. 2. Adutoras de água. 3. Modelos
de decisão de multicritérios espaciais. 4. Algoritmo de
busca geométrica. 5. SIG. I. Barbosa Curto Ma, Julia,
orient. II. Llacer Roig , Henrique, co-orient. III. Título.

À minha mãe Rachel Cristina Mortari.

Ao meu pai Antônio Jacinto Filho.

À minha tia Roberta Helena Mortari.

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio, ensinamentos, incentivos, torcida e muito amor ao longo de toda minha vida.

À minha orientadora Prof. Dr. Júlia Barbosa Curto Ma pelo cuidado, atenção, disponibilidade e principalmente pela boa vontade e delicadeza durante todo o tempo de trabalho.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica pela oportunidade de me desenvolver e crescer sempre.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 – pelo apoio para realização do trabalho.

Aos meus amigos Ágatha, Bruna, Clara, Felipe, Gabriel, Giovana, Isadora Dias, Isadora Guimarães, João, Juliana, Larissa, Luca, Luiz, Maria, Paulo, Pedro, Renata e Thatiane pela coragem, companhia, fé e especialmente por sempre sonharem junto comigo.

Resumo

A concepção de adutoras de água envolve elevados custos ambientais, sociais e econômicos, exigindo uma análise espacial integrada de múltiplos critérios. Para apoiar esse processo, aplica-se a metodologia integrada de combinação técnicas de tomada de decisão e algoritmo de busca geométrica em ambiente SIG. O modelo inclui a seleção dos critérios, a padronização das informações geográficas, a ponderação por diferentes métodos (Pesos Iguais, AHP e Pesos Inversos) e a geração da superfície de custo via álgebra de mapas. Em seguida, o algoritmo de Dijkstra identifica os caminhos de menor custo. Os resultados revelam desafios e oportunidades: traçados semelhantes surgem em áreas de baixa complexidade urbana, refletindo a robustez do modelo, enquanto zonas críticas indicam instabilidades e a necessidade de estudos complementares. A rota derivada do método AHP apresentou o melhor desempenho nos parâmetros analisados, proporcionando uma orientação fundamentada à análise exploratória em um estudo locacional de roteamento.

Palavras-chave: otimização de rotas, adutora, modelos de decisão de multicritérios espaciais, SIG, algoritmo de busca geométrica.

Abstract

The design of water pipelines involves significant environmental, social, and economic costs, requiring an integrated spatial analysis of multiple criteria. To support this process, an integrated methodology is applied, combining decision-making techniques with pathfinding algorithm in a GIS environment. The model includes the selection of relevant criteria, the standardization of geographic data, the weighting of criteria using different methods (Equal Weights, AHP, and Inverse Ranking), and the generation of the cost surface through map algebra. Then, Dijkstra's algorithm identifies the least-cost paths. The results reveal both challenges and opportunities: similar routes emerge in areas of low urban complexity, reflecting the model's robustness, while critical zones highlight areas of instability and the need for further studies. The route generated by the AHP method showed the best performance among the evaluated parameters, providing a well-founded framework to guide exploratory analysis in a locational routing study.

Keywords: route optimization, pipeline, spatial multi-criteria decision models, GIS, pathfinding algorithm.

FIGURAS

Figura 1 – Região de Estudo.....	4
Figura 2 – Esquema de Sistema de Abastecimento de Água em Planta (Tsutiya, 2004).	6
Figura 3 - Processos de um Modelo de Decisão de Multicritérios Espaciais. Fonte: O Autor.	9
Figura 4 - Estrutura típica de uma hierarquia (Lopes; Coelho; Libanio, 2011).....	13
Figura 5 – Matriz de Comparações Paritárias (Lopes; Coelho; Libanio, 2011).	13
Figura 6 –Áreas de Estudo I e II.	32
Figura 7 – Localização da Área de Estudo I.	33
Figura 8 – Dados de Entrada - Área de Estudo I.	34
Figura 9 – Localização da Área de Estudo II.....	36
Figura 10 – Dados de entrada - Área de Estudo II.....	37
Figura 11 – Bacia da Lagoa de Juturnaíba.....	39
Figura 12 – Fluxograma metodológico.....	44
Figura 13 – Planos de Informação – Área de Estudo I.	48
Figura 14 – Planos de Informação – Área de Estudo II.....	49
Figura 15 – Superfícies de Custos – Áreas de Estudo I e II.	56
Figura 16 – Rotas Calculadas pelo Algoritmo de Dijkstra – Área de Estudo I.	58
Figura 17 – Rotas Calculadas pelo Algoritmo de Dijkstra – Área de Estudo II.	59
Figura 18 – Zona Crítica de São Gonçalo – Área de Estudo I.....	60
Figura 19 – Zona Crítica de Silva Jardim – Área de Estudo II.....	61
Figura 20 – Zona Crítica de Rio Bonito – Área de Estudo II.	62
Figura 21 – Perfil de Favorabilidade – Área de Estudo I.	64
Figura 22 – Perfil de Favorabilidade – Área de Estudo II.	64

TABELAS

Tabela 1 – Componentes de um Sistema de Abastecimento de Água.	7
Tabela 2 - Escala Fundamental de Saaty (1977).	14
Tabela 3 - Índice Randômico (Saaty, 1991).	15
Tabela 4 – Processo de Desenvolvimento da Revisão Sistemática da Literatura (Kitchenham, 2007).	19
Tabela 5 - Artigos Seleccionados para Revisão Sistemática.	22
Tabela 6 – Critérios e Pesos dos Artigos da RSL.	28
Tabela 7 - Sistemas de Abastecimento na Lagoa de Juturnaíba e Afluentes.	40
Tabela 8 - Disponibilidade Hídrica – RH VI.	40
Tabela 9 - Disponibilidade Hídrica da BHLJ.	41
Tabela 10 - Base de dados vetoriais.	42
Tabela 11 –Graus de Favorabilidade dos Critérios de Avaliação.	47
Tabela 12 – Modelo da Matriz de Comparação.	50
Tabela 13 – Matriz de Comparação Par-a-Par não Normalizada.	55
Tabela 14 - Pesos dos Critérios.	55
Tabela 15 – Avaliação dos Traçados com Destaque em Verde para os Melhores Resultados.	63
Tabela 16 - Medidas Estatísticas dos Traçados em Relação às suas Superfícies de Custo com Destaque em Verde para os Melhores Resultados.	65

EQUAÇÕES

Equação 1 - Cálculo da Razão de Consistência	15
Equação 2 – Cálculo da Índice Consistência	15
Equação 3 - Cálculo do Autovalor Máximo	15
Equação 4 - Cálculo dos Pesos Inversos	16
Equação 5 - Fórmula para Cálculo da Superfície de Custo (Calculadora <i>Raster</i>)	51
Equação 6 - Aplicação da Distância de Hausdorff	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo.....	5
1.1.1	Objetivos específicos	5
1.2	Organização Metodológica	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Sistema de abastecimento de água	6
2.1.1	Sistemas adutores.....	7
2.2	Modelo de decisão de multicritérios espaciais	9
2.2.1	Métodos de ponderação	10
2.3	Algoritmo de busca geométrica.....	16
2.4	Revisão sistemática da literatura	18
2.4.1	Aplicação da RS.....	19
2.4.2	Estado da arte	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	Caracterização das áreas de estudo	30
3.1.1	Área de Estudo I – Sistema Imunana-Laranjal	30
3.1.2	Área de Estudo II – Sistema de Ampliação Proposto	35
3.2	Base de dados	42
3.3	Programas.....	42
3.4	Metodologia	43
3.4.1	Critérios de decisão.....	44
3.4.2	Padronização dos Planos de Informação.....	46
3.4.3	Consulta a especialistas.....	50
3.4.4	Ponderação dos Planos de Informação	50
3.4.5	Sobreposição ponderada	51

3.4.6	Rota de menor custo.....	52
3.4.7	Avaliação dos caminhamentos.....	52
4	RESULTADOS	54
4.1	Ponderações.....	54
4.2	Traçados	57
4.3	Parâmetros de avaliação	63
5	DISCUSSÃO	66
6	CONCLUSÃO.....	71
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1 INTRODUÇÃO

O atendimento de água, em qualidade e quantidade, à população é uma das principais prioridades quanto à saúde, saneamento e desenvolvimento de uma comunidade. Para garantir que o acesso à água seja satisfatório, sistemas de abastecimento devem seguir diretrizes e parâmetros que consideram aspectos como caracterização de área de estudo, condição do abastecimento existente, estudos demográficos, demanda de água e alternativas de solução (Tsutiya, 2006).

O processo de concepção de sistemas de abastecimento envolve o pré-dimensionamento das unidades que o compõem. O planejamento de um novo sistema de abastecimento de água ou de sua ampliação inicia-se com a busca de um manancial em potencial que seja capaz de suprir a demanda de água necessária. Em seguida deve-se considerar o direcionamento da água a partir do corpo hídrico para as demais unidades do sistema por meio de um sistema adutor (Tsutiya, 2006).

Tsutiya (2006) descreve aspectos para o pré-dimensionamento de uma adutora como alternativas de traçados, avaliação técnica-econômica das alternativas, definição do traçado, pré-dimensionamento hidráulico, definição do material, identificação de travessias (rios, rodovias, ferrovias, faixa de servidão, desapropriação de terras e áreas de proteção ambiental) e demais interferências.

De acordo com Lacerda (2009a), ao se conceber uma adutora, é importante estimar por soluções que, além de atender os requisitos primários, otimizem a implantação e operação do sistema para reduzir gastos e perturbações. Uma obra como essa envolve custos ambientais, sociais e econômicos elevados, além de que a adução pode ser classificada como uma das etapas que acarreta os maiores investimentos, influenciado por fatores como diâmetro, material e extensão dos tubos, a natureza dos solos e a topografia da área de intervenção (Cordão; Lacerda; Neto, 2012; Lacerda, 2009b).

A otimização de traçados de adutoras refere-se a definição do caminho de melhor custo-benefício, seja pela minimização de tempo, resistência à passagem, investimento financeiro ou impactos à sociedade e ao meio ambiente.

A definição de rotas otimizadas tem sido o foco de estudos em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que utilizam de ferramentas de análise espacial, apoio a tomada de decisão

e automação (Amaral; Cirilo; Ribeiro Neto, 2020; González-Pavón *et al.*, 2024; Raj; Bansal, 2023). Esse processo implica na avaliação de diversos critérios espacializáveis, logo, a aplicação de um modelo de decisão de multicritérios espaciais, baseado na integração de metodologias de auxílio à tomada de decisão e algoritmos de busca geométrica em um ambiente de SIG, apresenta-se como promissora para definir um traçado otimizado de uma adutora de abastecimento de água.

Observa-se na literatura global uma escassez de estudos que empregam a integração de SIG com abordagens de ponderação de critérios em pesquisas sobre a definição de rotas de maior aptidão para a implantação de sistemas adutores de água. No entanto a metodologia é amplamente aplicada no contexto de outras obras lineares de engenharia como gasodutos, oleodutos e linhas de transmissão (Abudu; Williams, 2015; Wang *et al.*, 2022; Yildirim *et al.*, 2016).

Os SIGs constituem estruturas flexíveis que podem ser integradas a metodologias de apoio à decisão multicritério. Os critérios de análise, bem como suas respectivas importâncias relativas, são definidos de acordo com a natureza da área de estudo e os objetivos do projeto (Lopes; Coelho; Libanio, 2011). Para estimar os pesos dos critérios, diferentes métodos de ponderação podem ser aplicados, e a comparação entre os resultados obtidos permite avaliar a sensibilidade do modelo de decisão. Neste estudo, foram utilizadas três abordagens de ponderação: Pesos Iguais, Análise Hierárquica de Processos (AHP) e Pesos Inversos. O objetivo é analisar os desempenhos dos resultados gerados, além de identificar pontos de convergência e divergência entre os produtos finais.

A sobreposição das camadas espaciais, referentes a cada critério de decisão, padronizadas e ponderadas, gera uma superfície de custo. Por meio dela, é possível identificar espacialmente as áreas de maior ou menor aptidão à alocação da adutora e, conseqüentemente, determinar uma rota otimizada. Nesse contexto, cabe a aplicação de um algoritmo de busca geométrica, que busca determinar uma rota otimizada entre dois pontos dentro de um espaço geográfico (Duarte, 2023; Kathuo; Mubea, 2016).

De forma a investigar desdobramentos e limitações da metodologia descrita, o presente estudo buscou aplicá-la em um contexto real que justifique sua relevância e permita avaliar sua efetividade. Assim, o estudo de caso escolhido reflete uma problemática concreta relacionada à escassez hídrica e à necessidade de expansão da infraestrutura de abastecimento.

Parte-se da hipótese de que metodologia de integração de métodos ponderativos e algoritmo de busca geométrica, como algoritmo de Dijkstra, não apenas permite a identificação de trajetos tecnicamente viáveis e factíveis do ponto de vista da engenharia, como também contribui para a redução de riscos operacionais e conflitos socioambientais associados à implantação de grandes obras lineares. Ao considerar simultaneamente fatores ambientais, econômicos e sociais de maneira espacializada e ponderada, espera-se que o modelo gere soluções equilibradas e sustentáveis, a fim de promover a eficiência do processo decisório e otimização dos custos globais do projeto.

O estudo de caso escolhido envolve a Região Leste Metropolitana do Rio de Janeiro, que enfrenta uma conjuntura de insegurança hídrica em decorrência do déficit de produção de água e da estrutura do sistema de abastecimento integrado (SIN) Imunana-Laranjal que atende a região (Britto; Johnsson; Carneiro, 2016; Pereira; Canedo; Capodeferro, 2022).

Algumas alternativas são propostas para o reforço do abastecimento de água para a região, entre elas considera-se a possibilidade de captação de água no manancial Lagoa de Juturnaíba e transportá-la por aproximadamente 80 km por meio de uma tubulação (adutora) até o SIN Imunana-Laranjal (LabHid-Coppe/UFRJ, 2014).

O presente trabalho utiliza Modelos de Decisão de Multicritérios Espaciais com o objetivo de determinar caminhos favoráveis para a adutora proposta, considerando o cenário de ampliação do Sistema Imunana-Laranjal a partir da Lagoa de Juturnaíba. A metodologia fundamenta-se na integração métodos de ponderação e o algoritmo de Dijkstra em um ambiente SIG.

O modelo é aplicado em duas áreas de estudo (Figura 1), a primeira (Área de Estudo I) é utilizada para validar o modelo por meio de análise comparativa com a adutora existente (Adutora Laranjal). Enquanto a segunda (Área de Estudo II) representa o território destinado à aplicação final do modelo, com o objetivo de projetar um sistema adutor de água conectando a Lagoa de Juturnaíba à Estação de Tratamento de Água (ETA) Laranjal.

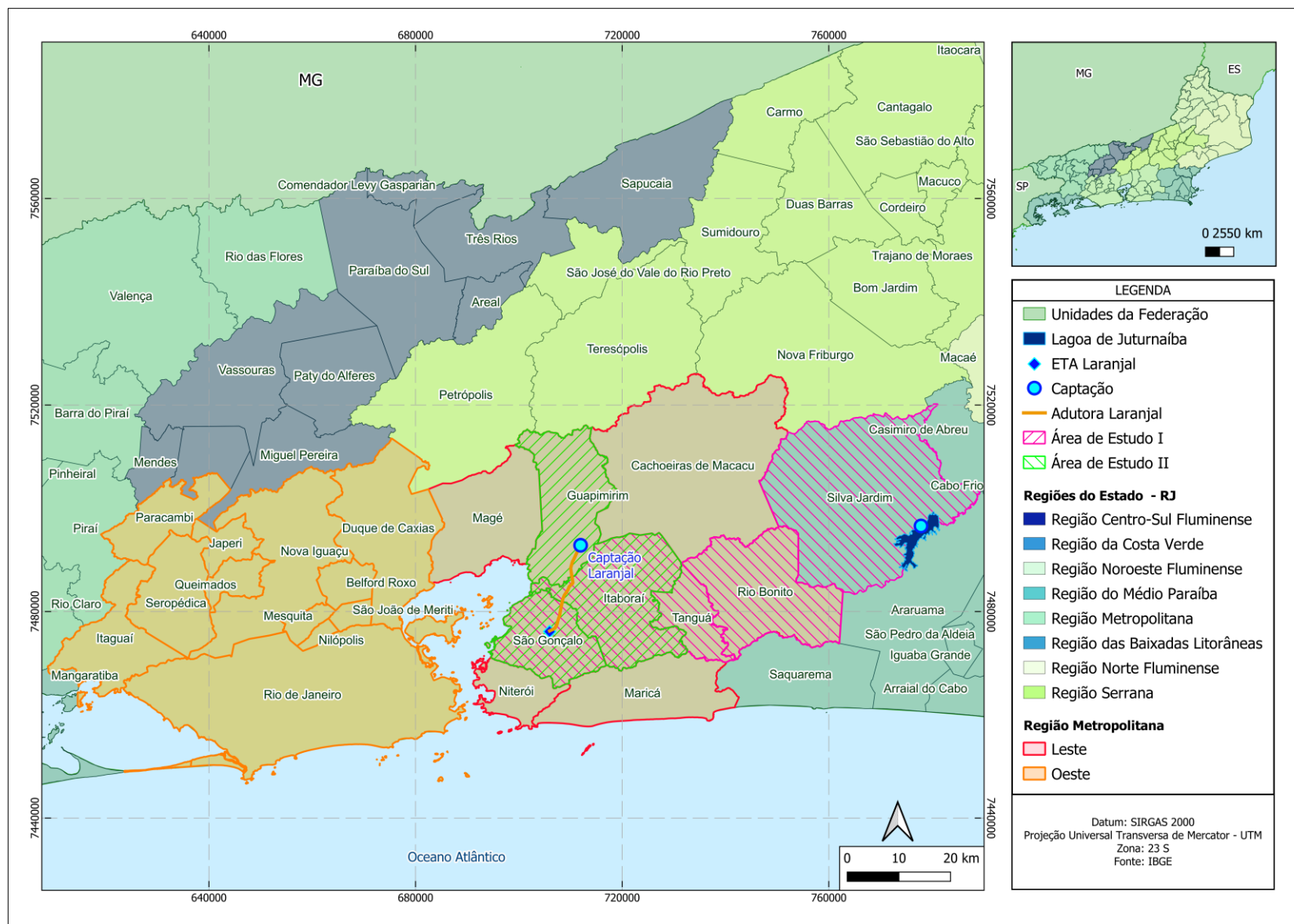


Figura 1 – Região de Estudo.

1.1 Objetivo

Este projeto visa aplicar modelos multicritérios por meio de combinação de técnicas de geoprocessamento, de tomada de decisão e aplicação de algoritmo de busca geométrica para a otimização de um sistema adutor proposto diante o cenário de ampliação do abastecimento do SIN Imunana-Laranjal a partir do manancial Lagoa de Juturnaíba.

1.1.1 Objetivos específicos

- Definir dos critérios de decisão para a otimização do traçado de uma adutora de água;
- Analisar a sensibilidade do modelo diante as ponderações dos critérios;
- Gerar traçados por meio do algoritmo de Dijkstra e avaliar seus desempenhos.

1.2 Organização Metodológica

A metodologia do trabalho inicia-se com a coleta dos dados espaciais referentes aos critérios de análises. As informações são de acesso público e são obtidas por meio de portais de instituições ambientais e governamentais. Os dados são organizados, processados e padronizados. Posteriormente é realizada um levantamento bibliográfico e consulta a especialistas para validação dos critérios selecionados e embasamento para o processo de ponderação relativa dos critérios. São aplicados três métodos ponderativos: Pesos Iguais, Análise Hierárquica de Processos e Pesos Inversos.

Com os pesos obtidos, é realizada uma sobreposição ponderada dos critérios via álgebra de mapas, gerando três superfícies de custo. Sobre cada superfície, aplica-se o algoritmo de Dijkstra para traçar as rotas de menor custo. Os caminhos resultantes são avaliados por meio de indicadores como Distância de Hausdorff, extensão dos trajetos, perfil de favorabilidade e estatísticas dos valores dos pixels ao longo das rotas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente são discutidos os elementos centrais de sistemas de abastecimento de água, abordando seus componentes, funcionamento e desafios. Em seguida, o foco é direcionado para modelos de decisão de multicritérios espaciais, com ênfase nos instrumentos que possibilitam essa avaliação como a Análise Hierárquica de Processos, para ponderação de critérios. e algoritmo de Dijkstra, utilizado para a otimização de rotas em soluções espaciais. Por fim, são apresentados a revisão sistemática da literatura e o estado da arte.

2.1 Sistema de abastecimento de água

A Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997) define o uso da água para abastecimento humano como uso prioritário. O atendimento às necessidades da população em relação à quantidade e qualidade da água perpassa pela concepção de um sistema de abastecimento de água, o qual envolve conjuntos de estudos e conclusões referentes ao estabelecimento de todas as diretrizes, parâmetros e definições necessárias para a caracterização completa do sistema (Tsutiya, 2006).

A Tabela 1 apresenta os elementos que compõe um sistema de abastecimento de água e uma breve descrição de acordo com Tsutiya (2006) e a Figura 2 exibe um esquema de como esses elementos são dispostos.

Um sistema desse porte e complexidade, que representa enorme significância para população, e envolve custos elevados exige um planejamento aprofundado e minucioso. A adutora é um elemento que deve ser projetado sob uma criteriosa análise de seu traçado em planta e perfil, pois a depender da sua extensão pode ser uma das unidades com maior custo de implantação (Cordão; Lacerda; Neto, 2012; Tsutiya, 2006).

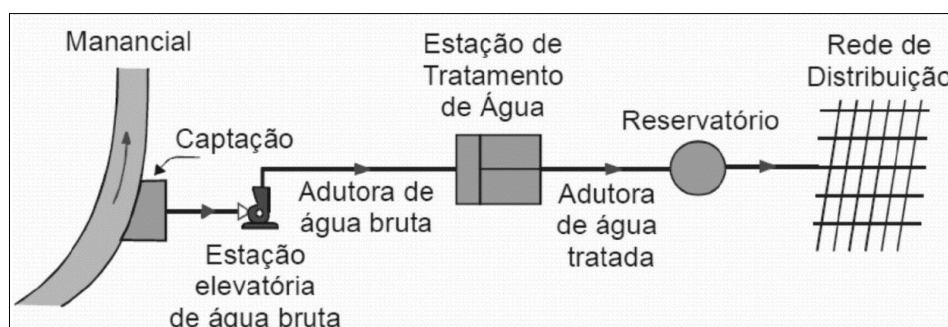


Figura 2 – Esquema de Sistema de Abastecimento de Água em Planta (Tsutiya, 2004).

Tabela 1 – Componentes de um Sistema de Abastecimento de Água.

Elemento	Descrição
Manancial	Corpo de água superficial ou subterrâneo usado para abastecimento, fornecendo vazão suficiente e água de qualidade sanitária adequada.
Captação	Conjunto de estruturas junto ao manancial para retirar água destinada ao sistema de abastecimento.
Estação Elevatória	Conjunto de obras e equipamentos para recalcar água para a unidade seguinte, podendo aumentar pressão/vazão. Pode existir em sistemas de água bruta e tratada, incluindo "boosters".
Adutora	Canalização para conduzir água entre unidades antes da rede de distribuição. Pode se derivar em ser sub-adutoras.
Estação de Tratamento Água	Conjunto de unidades para tratar a água, adequando-a aos padrões de potabilidade.
Reservatório	Elemento do sistema de distribuição para regularizar vazões e condicionar pressões na rede de distribuição.
Rede de Distribuição	Tubulações e órgãos acessórios destinados a disponibilizar água potável aos consumidores, garantindo continuidade, quantidade e pressão adequada.

2.1.1 Sistemas adutores

Os sistemas adutores consistem em canalizações dos sistemas de abastecimento de água que conduzem a água e interligam as unidades que precedem a rede de distribuição (Figura 1). As adutoras podem ser classificadas quanto à natureza da água transportada (adutoras de água bruta ou adutoras de água tratada) e quanto à energia para a movimentação da água (adutoras por gravidade, adutoras por recalque ou adutoras mistas) (Tsutiya, 2006).

De forma a garantir que o sistema de abastecimento de água opere de forma adequada e segura, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), desenvolveu uma série de normas para cada elemento do sistema. Especificamente, o projeto de adutoras para abastecimento público é regulamentado pela NBR 12.215/2017, elaborada no Comitê Brasileiro de Saneamento Básico (ABNT/CB-177) pela Comissão de Estudo de Projetos para Sistemas de Saneamento, estruturada em duas partes, a primeira referente a condutos forçados e a segunda a dutos livres. São definidos no documento requisitos para o desenvolvimento do projeto os parâmetros do sistema como vazão, dimensionamento, velocidade, materiais, análise de transitórios hidráulicos, elementos e equipamentos e caminhamento da adutora.

Tsutiya (2006) apresenta, como primeira etapa para o pré-dimensionamento da unidade de adução, o desenvolvimento de alternativas de traçado, as quais consideram diversos fatores para a sua concepção. O autor ainda apresenta algumas recomendações para a diminuição dos custos de implantação de adutoras:

- Priorizar a implantação da adutora em terrenos públicos;
- Evitar terrenos de difícil acesso e operação como afloramentos rochosos e áreas pantanosas;
- Preferir traçados com trechos ascendentes longos com pequena declividade, seguido de trechos descendentes curtos, com maior declividade.

A alternativa de melhor custo-benefício do caminamento pode implicar diretamente uma redução de gastos por materiais para canalização, redução da mão de obra, diminuição significativa das perdas por meio da transmissão, além de prover o serviço de transporte de água no menor tempo possível (Kathuo; Mubea, 2016). Cordão, Lacerda e Neto (2012) argumentam que o traçado da adutora interfere em outras questões do projeto de um sistema de abastecimento, como acessibilidade para operação e manutenção, quantidade e tipos de elementos de proteção a serem instalados, e altura manométrica das estações elevatórias.

A concepção de um traçado otimizado para um sistema adutor envolve a consideração de uma variedade de fatores que podem ser antagônicos entre si. Entre esses fatores, destacam-se como exemplo a declividade e altimetria do terreno, proximidade com rodovias, afastamento de cursos d'água, tipos de uso do solo e a natureza pedológica da região.

Uma abordagem exploratória que tem se mostrado eficaz para lidar com essa problemática é a análise de multicritérios espaciais. Essa metodologia permite a avaliação e a ponderação de diferentes critérios simultaneamente, auxiliando na obtenção de resultados preliminares que orientam a resolução de problemas espaciais de grande complexidade, como projetos de obras lineares de engenharia. Por meio dessa ferramenta, é possível identificar soluções que equilibram os objetivos e restrições do projeto, contribuindo para uma tomada de decisão embasada e mais assertiva.

2.2 Modelo de decisão de multicritérios espaciais

Estudos locacionais envolvem um conjunto de alternativas viáveis ou múltiplos critérios de avaliação conflitantes e incomensuráveis. As alternativas são frequentemente avaliadas por diversos indivíduos (tomadores de decisão, gestores, partes interessadas, grupos de interesse). Tais indivíduos apresentam preferências únicas em relação à importância relativa dos critérios com base nos quais as alternativas são avaliadas (Malczewski, 2006).

Os modelos de decisão de multicritérios são instrumentos de apoio à tomada de decisão, baseados em ferramentas matemáticas, que visam a resolução de problemas em que existe muitas variáveis e que exige um sistema de avaliação complexo (Gomes; Gomes, 2014; Greco; Ehrgott; Figueira, 2016). Em algumas situações, como é o caso em que o presente trabalho se propõe a estudar, as variáveis são espacializáveis, ou seja, é possível representá-las no espaço geográfico.

A metodologia de um modelo de decisão de multicritérios espaciais envolve diversas etapas. Inicialmente, o problema é definido e estruturado, identificando-se os critérios espaciais de avaliação relevantes. Os dados georreferenciados associados a esses critérios são então coletados e padronizados para garantir consistência. Em seguida, os critérios são ponderados com base em suas importâncias relativas. Posteriormente, é aplicada a álgebra de mapas para combinar os mapas temáticos de cada critério. O resultado desse processo é a criação de uma superfície de custo, que representa a integração dos critérios ponderados em uma única camada espacial. Esta superfície de custo é então analisada e as alternativas são ordenadas de acordo com os objetivos do estudo (Borouhaki; Malczewski, 2010). A Figura 3 esquematiza o processo acima descrito.

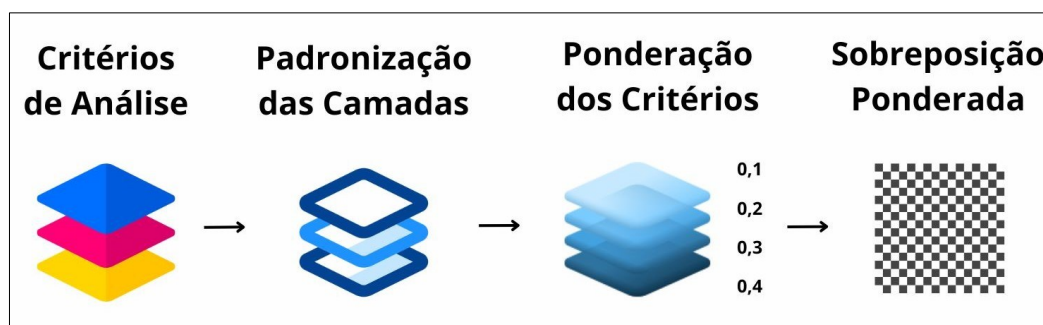


Figura 3 - Processos de um Modelo de Decisão de Multicritérios Espaciais. Fonte: O Autor.

Um modelo de decisão de multicritérios espaciais consiste no processo de transformar e combinar informações espaciais e julgamento de valores dos tomadores de decisão, considerando suas preferências e incertezas, de maneira a orientar a solução do problema em análise. A integração entre SIG e análise de decisão multicritério se justifica pela complementação dessas duas áreas. Enquanto o SIG é reconhecido como uma ferramenta poderosa e integrada, com capacidades únicas de armazenar, manipular, analisar e visualizar dados espaciais para a tomada de decisões, a análise de multicritérios fornece um conjunto de procedimentos e algoritmos para estruturar problemas de decisão, projetar, avaliar e priorizar decisões alternativas (Borouhaki; Malczewski, 2010; Malczewski, 1999, 2006)

Jankowski (1995) explica que há duas abordagens de integração de SIG e análise de multicritérios, chamadas de estratégia de acoplamento frouxo e justo. A primeira remete a uma associação onde as técnicas possuem interfaces únicas, sendo independentes entre si e se conectam por meio de uma troca de arquivos. Já a segunda refere-se a uma adaptação unificada das plataformas, onde existe apenas uma interface de operação.

Há, na literatura, a utilização de modelos de multicritérios para diversas aplicações considerando diferentes tipos de variáveis e contextos, como identificar o melhor local para a instalação de uma unidade hospitalar, aterro sanitário ou armazém agrícola (Briozzo; Musetti, 2015; Ornelas, 2011; Souza; Oliveira; Souza, 2023). Observa-se uma escassez de estudos que empregam a integração de SIG com análise de multicritérios em pesquisas sobre a definição de rotas otimizadas para a implantação de sistemas adutores de água, no entanto a metodologia é aplicada no contexto de outras obras lineares de engenharia como gasodutos, oleodutos e linhas de transmissão (Abudu; Williams, 2015; Wang *et al.*, 2022; Yildirim *et al.*, 2016).

2.2.1 Métodos de ponderação

O processo de ponderação dos critérios de análise pode ocorrer por diferentes metodologias e varia de acordo com suas aplicações, contexto das informações e o operador do sistema. Metodologias de suporte à decisão para cenários complexos com múltiplos critérios são utilizadas para auxiliar os tomadores de decisão a lidarem com situações que envolvem diversos aspectos, muitas vezes conflitantes entre si. Esses sistemas oferecem estruturas para análise e avaliação de alternativas, permitindo que os decisores ponderem diferentes objetivos,

considerem suas inter-relações e cheguem a decisões que equilibrem melhor esses objetivos divergentes.

A literatura apresenta o uso da consulta a especialistas como um recurso para embasar o processo ponderativo e orientar o operador em uma análise mais precisa, permitindo agregar conhecimento técnico e experiência prática à formulação do problema e à definição das estratégias de solução. A consulta pode envolver profissionais do setor, pesquisadores acadêmicos ou outros agentes com experiência relevante na área de estudo. As abordagens para essa interação variam desde entrevistas estruturadas e semiestruturadas até painéis de discussão e métodos formais. O objetivo é obter perspectivas qualificadas que ajudem a refinar hipóteses, validar critérios de análise e reduzir incertezas no processo decisório (Abudu; Williams, 2015; Amaral; Cirilo; Ribeiro Neto, 2020; González-Pavón *et al.*, 2024; Macharia; Wathuo; Mundia, 2015; Motiee *et al.*, 2023; Nonis; Varghese; Suresh, 2007; Raj; Bansal, 2023; Wang *et al.*, 2022).

Além de fornecer subsídios para a modelagem do problema, a consulta a especialistas também pode contribuir para a identificação de fatores críticos que, de outra forma, poderiam ser negligenciados. Dessa forma, o conhecimento especializado não apenas fortalece a base analítica do estudo, mas também confere maior confiabilidade às conclusões obtidas.

Uma vez que se tem conhecimento acerca do objetivo do problema que se pretende resolver, os critérios envolvidos na análise e a sua relação de importância, pode-se determinar valores numéricos para traduzir a sua relevância.

Os métodos de ponderação, apesar de buscarem um resultado parcial a partir de uma avaliação global, ainda estão sujeitos à subjetividade do operador do sistema que realiza a análise, uma vez que o processo de ponderação entre os critérios parte da avaliação de um ser humano. Os modelos convertem preferências e julgamentos em valores numéricos, estruturando um modelo de tomada de decisão. Por meio dessa abordagem, os pesos atribuídos refletem a prioridade relativa de cada elemento, organizando-os em uma hierarquia que facilita a análise comparativa e a escolha mais adequada dentro do processo decisório (Saaty, 1977).

São apresentados modelos de decisão multicritérios baseados em diferentes metodologias para valoração dos aspectos que compõem a análise.

2.2.1.1 Pesos Iguais

O método de Pesos Iguais atribui a mesma importância a todos os critérios considerados em uma decisão. Se o tomador de decisão não possui informações sobre os pesos "verdadeiros", assume-se que os pesos podem ser representados por uma distribuição uniforme. A formulação geral para cada peso w_j é simplesmente $1/N$, onde N é o número de critérios. Sua aplicação fácil e simples é vantajosa quando não se tem informações prévias em relação à importância dos atributos (Roszkowska, 2013; Stillwell; Seaver; Edwards, 1981).

Nagel e Bievenue (1989) recomendam a aplicação dessa abordagem como estratégia inicial para identificar tendências gerais nos resultados, antes de realizar análises mais detalhadas e complexas. Este método fornece uma linha de base para comparar os resultados com demais metodologias de ponderação.

2.2.1.2 Análise hierárquica de processos

A Análise Hierárquica de Processos, desenvolvido por Saaty (1977), é uma metodologia recorrente na literatura em estudos de problemas espaciais. O método AHP destaca-se pela sua facilidade de aplicação e capacidade de replicação computacional, o que aumenta a rapidez e a precisão dos resultados. Inicialmente aplicado em contextos empresariais e organizacionais, a AHP foi amplamente adotado em diversas áreas, incluindo administração pública, aplicações militares e formulação de políticas (Saaty, 2008).

A metodologia AHP envolve as etapas de identificação de objetivos e critérios relevantes, estruturação em um modelo hierárquico, ponderação dos critérios por meio de comparações paritárias usando a escala fundamental de Saaty, e avaliação das alternativas. O processo garante que todos os elementos em cada nível da hierarquia sejam independentes e que a importância relativa de cada critério seja refletida com precisão através de julgamentos consistentes. Essa abordagem estruturada permite tanto a avaliação quantitativa quanto qualitativa das alternativas, assegurando uma tomada de decisão robusta e bem equilibrada (Lopes; Coelho; Libanio, 2011).

A ferramenta se utiliza da definição de prioridades e da escolha da melhor alternativa, sendo também considerados aspectos quantitativos e qualitativos. Os passos para aplicação da metodologia são descritos por Lopes e Coelho e Libanio (2011).

1. **Identificação dos objetivos:** Identificar claramente os objetivos e critérios relevantes para a decisão em questão.
2. **Estruturação do problema:** Organizar os objetivos em uma hierarquia, separando os critérios e subcritério em níveis distintos e garantindo que os elementos de cada nível são independentes (Figura 4).
3. **Ponderação dos critérios:** Construir uma matriz de comparação paritária para atribuir pesos aos diferentes critérios de cada nível de acordo com sua importância relativa para os objetivos gerais (Figura 5). Para a definição da hierarquia entre os critérios, utiliza-se a Escala Fundamental de Saaty (1977) (Tabela 2).
4. **Avaliação das alternativas:** Determinar a consistência dos julgamentos ao avaliar cada alternativa em relação aos critérios estabelecidos, utilizando técnicas qualitativas ou quantitativas.

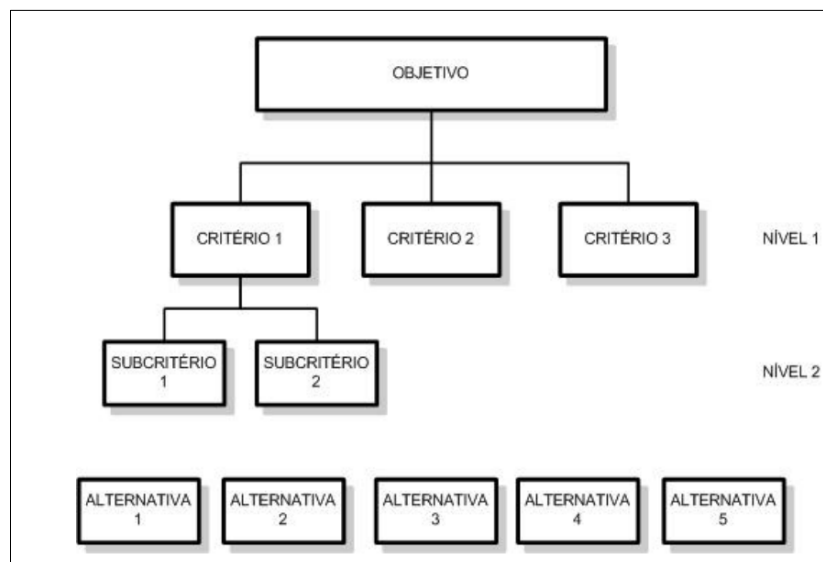


Figura 4 - Estrutura típica de uma hierarquia (Lopes; Coelho; Libanio, 2011).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 5 – Matriz de Comparações Paritárias (Lopes; Coelho; Libanio, 2011).

O processo de ponderação é dividido em etapas organizadas para garantir uma análise confiável. Primeiramente, constrói-se a matriz onde cada critério é comparado a todos os outros dois a dois, avaliando sua importância relativa. A Escala Fundamental de Saaty varia de 1 a 9: 1 indica igual importância entre dois critérios, enquanto valores maiores expressam maior predominância de um critério sobre o outro. Se, por exemplo, o critério *A* for considerado três vezes mais importante que *B*, o valor atribuído será 3 em A/B e $1/3$ em B/A , garantindo simetria na matriz (Saaty, 1977, 1991).

A diagonal principal da matriz sempre contém o valor 1, pois representa a comparação de um critério consigo mesmo. Após o preenchimento, a matriz é normalizada dividindo-se cada elemento pelo somatório de sua respectiva coluna, permitindo que os valores fiquem em uma escala comparável. Em seguida, é calculado o vetor de prioridades (w) relativo de cada critério, que corresponde à média dos valores de cada linha da matriz normalizada, indicando a hierarquia de importância dos critérios (Saaty, 1991).

Tabela 2 - Escala Fundamental de Saaty (1977).

Valores	Importância Mútua
1/9	Extremamente menos importante
1/7	Muito fortemente menos importante
1/5	Fortemente menos importante
1/3	Moderadamente menos importante
1	Igualmente importante
3	Moderadamente mais importante
5	Fortemente mais importante
7	Muito fortemente mais importante
9	Extremamente mais importante

Para determinar a consistência de uma matriz de comparações, calcula-se a Razão de Consistência (RC) (Equação 1), sendo aceitáveis valores inferiores a 0,10. A RC é obtida pela razão entre o Índice de Consistência (IC), que mede a coerência dos julgamentos em relação aos pesos atribuídos, e o Índice Randômico (IR), um valor tabelado que depende do tamanho da matriz (Tabela 3). Quanto menor o IC, mais consistentes são os julgamentos. Se o IC dividido pelo IR gerar uma RC abaixo de 0,10, os julgamentos são considerados consistentes; caso contrário, recomenda-se revisar a matriz para corrigir incoerências (Lopes; Coelho; Libanio, 2011; Saaty, 1977, 1991).

O cálculo do IC (Equação 2) requer a determinação do autovalor máximo da matriz ($\lambda_{\text{máx}}$), estimado multiplicando a matriz de comparações inicial (M_p) pelo vetor de prioridades (w). Os componentes do vetor resultante ($M_p * w$) são divididos pelos valores correspondentes no vetor de prioridades (w) (Equação 3). A média dos valores da nova matriz gerada é o $\lambda_{\text{máx}}$. Quanto mais próximo $\lambda_{\text{máx}}$ estiver do número de critérios (n , a ordem da matriz), mais consistente será o julgamento (Saaty, 1977, 1991).

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

Equação 1 - Cálculo da Razão de Consistência

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1}$$

Equação 2 – Cálculo da Índice Consistência

$$\lambda_{\text{máx}} = \text{valor médio do vetor} \frac{M_p * w}{w}$$

Equação 3 - Cálculo do Autovalor Máximo

Tabela 3 - Índice Randômico (Saaty, 1991).

Ordem	IR	Ordem	IR	Ordem	IR
1	0	6	1,24	11	1,51
2	0	7	1,32	12	1,48
3	0,58	8	1,41	13	1,56
4	0,9	9	1,45	14	1,57
5	1,12	10	1,49	15	1,59

2.2.1.3 Pesos Inversos

O método dos Pesos Inversos - ou Recíprocos - (*Rank Reciprocal Weights - RR*) é uma técnica de ponderação baseada na classificação dos critérios, na qual os pesos derivam da organização dos atributos por uma ordem importância. O método atribui pesos diferenciados enquanto simplifica os julgamentos necessários (Stillwell; Seaver; Edwards, 1981).

Sua aplicação é adequada para situações onde a ordem de importância dos critérios é conhecida, mas a definição precisa dos pesos é difícil ou impraticável. Pode ser usado em cenários de pressão de tempo, falta de conhecimento, informação imprecisa ou incompleta ou capacidade limitada de processamento de informação do tomador de decisão. É adequado quando os tomadores de decisão estão mais confiantes sobre a classificação dos critérios do que sobre seus pesos exatos (Roszkowska, 2013).

O peso de um atributo Wi é calculado como o inverso de sua classificação ($1/Ri$), dividido pela soma dos inversos das classificações de todos os atributos (Equação 4).

$$Wi = \frac{\frac{1}{Ri}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Ri}}$$

Equação 4 - Cálculo dos Pesos Inversos

Onde,

W = peso de importância relativa

R = colocação na ordem de preferência entre os critérios da análise

2.3 Algoritmo de busca geométrica

Um algoritmo pode ser definido como um conjunto estruturado de processos não ambíguos, projetado para executar uma tarefa específica ou obter um resultado a partir de dados de entrada por meio de cálculos sistemáticos. Assim, um algoritmo de busca é desenvolvido para localizar um ou mais elementos que atendam a determinados critérios dentro de um conjunto de dados. Especificamente, um algoritmo de busca geométrica consiste em uma estrutura de comandos que visa solucionar problemas relacionados à localização ou navegação em um espaço geométrico, como um grafo (Doneda; Almeida, 2018; Gillespie, 2013; Light, 1999).

No âmbito da análise espacial, um grafo representa um modelo matemático que expressa a complexidade da organização espacial e geográfica. Seus nós correspondem a pontos de interesse, como interseções viárias ou locais estratégicos, enquanto as arestas representam as conexões entre esses pontos, como ruas, rodovias ou trilhas. O peso atribuído às arestas pode refletir diferentes restrições de passagem, incluindo distância, tempo de deslocamento, custo energético e de transporte, ou ainda limitações impostas por barreiras naturais e infraestruturas existentes (Kainz, 2010).

A busca pelo menor caminho entre dois pontos de um grafo constitui um problema clássico da ciência da computação, com aplicações em diversos domínios. Essa análise é essencial para atender às demandas de indivíduos e organizações em contextos como sistemas

de navegação veicular, mapeamento cartográfico, planejamento de infraestrutura, otimização de rotas de transporte e consultas espaciais em bancos de dados geográficos (Neves, 2007).

Os algoritmos de busca geométrica (*path-finding algorithms*) investigam o caminho mínimo entre um ponto de origem e um destino em um grafo ponderado com pesos não negativos, utilizando diferentes estratégias. Os algoritmos como o *Ant Colony Optimization* e *A** usam conhecimento específico do problema (heurística) e conduzem a solução de forma mais orientada, consequentemente operam em uma performance mais eficiente, no entanto o resultado é diretamente dependente das condições que determinam a heurística (Dorigo; Birattari; Stutzle, 2006; LaValle, 2006).

O algoritmo de Dijkstra por sua vez não utiliza heurística, logo, realiza sua pesquisa de forma mais branda e determina o menor caminho explorando, de forma iterativa, os vizinhos de cada nó na ordem crescente de custo acumulado a partir do nó inicial. Essa abordagem permite a construção de uma árvore de caminhos mínimos que conecta um único nó a todos os outros do grafo, garantindo a determinação da menor distância entre qualquer par de nós (Dijkstra, 1959).

O processo iterativo se dá por meio da rotulação de nós, sendo o nó inicial rotulado como $[0, -]$ indicando custo zero e ausência de antecessor. Os demais nós são considerados temporários e a cada iteração, o algoritmo seleciona o nó temporário com o menor custo acumulado e o transforma em permanente. A atualização dos rótulos segue a equação $[c_j, i] = [c_i + c_{ij}, i]$, $c_{ij} \geq 0$, onde c_i é o menor custo conhecido até o nó i e c_{ij} é o custo da aresta entre i e j . Assim, o algoritmo estima sucessivamente o caminho de menor custo (Freiman; Dos Santos, 2019; Taha, 2008)

Embora o algoritmo de Dijkstra apresente uma alta taxa de sucesso e, em alguns casos, possa identificar múltiplas rotas ótimas, ele possui uma limitação significativa em termos de eficiência computacional. Isso ocorre porque a estratégia de exploração empregada pode resultar na análise de diversos caminhos desnecessários antes de se chegar à solução desejada, tornando sua aplicação inviável em grafos de grande escala ou em problemas que exigem respostas em tempo real (Neves, 2007; Tang et al., 2021).

Apesar dessas limitações, o algoritmo de Dijkstra continua sendo amplamente utilizado para a otimização de rotas (Amaral, 2017; González-Pavón *et al.*, 2024; Raj; Bansal, 2023). Sua popularidade se deve à confiabilidade e à garantia matemática de encontrar a solução

ótima, além da existência de otimizações que melhoram seu desempenho em contextos específicos (Neves, 2007).

2.4 Revisão sistemática da literatura

Essa pesquisa procurou identificar lacunas no conhecimento sobre o problema de traçado otimizado de rotas para tubulações de água. Para isso, a revisão sistemática da literatura (RSL) foi utilizada para observar áreas que requerem maior investigação, tendências futuras e desvio de redundâncias nos estudos. A RSL é uma metodologia específica de pesquisa que consiste em um meio de identificar, avaliar e interpretar pesquisas disponíveis acerca de um determinado assunto. A RSL configura-se como um estudo secundário que depende dos resultados dos estudos primários analisados (Kitchenham, 2004).

Biolchini *et al.* (2007) analisam temporalmente a prática de integração de pesquisa como proposta metodológica e relatam a aplicação da técnica desde o século 20 e em diferentes áreas do conhecimento. A revisão sistemática sintetiza o trabalho de pesquisa existente de maneira justa e deve ser construída de acordo com uma estratégia de busca predefinida.

Kitchenham (2004) apresenta que tal estratégia deve permitir amplitude da exploração, sendo relatadas pesquisas que apoiem tanto uma linha de pensamento quanto demais linhas antagônicas, caso existam. A autora explica que o procedimento para o desenvolvimento da revisão bibliográfica pode variar em relação ao número e ordem das etapas do processo, no entanto, existe um consenso acadêmico que estrutura o processo (Tabela 4).

De modo a orientar e auxiliar os pesquisadores com os processos da RSL, programas foram desenvolvidos com o objetivo de apresentar uma solução computacional para uma atividade trabalhosa e repetitiva. Entre essas ferramentas, destaca-se o programa *StArt* (*State of the Art through Systematic Review*) que foi desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) (Hernandes *et al.*, 2012). O *StArt* incorpora as etapas definidas por Kitchenham (2004) e ostenta grande aderência pela comunidade científica, além de ser um programa gratuito. A ferramenta apresenta um modelo de trabalho individual, não sendo sugerida para trabalhos colaborativos.

Tabela 4 – Processo de Desenvolvimento da Revisão Sistemática da Literatura (Kitchenham, 2007).

Etapa	Atividade
Planejamento	Identificação da necessidade da pesquisa
	Solicitação da revisão*
	Especificação da(s) questão(ões) de pesquisa
	Desenvolvimento do protocolo de revisão
	Avaliação do protocolo de revisão*
	Identificação da pesquisa
	Seleção dos estudos primários
Execução	Avaliação da qualidade dos estudos
	Extração e monitoramento das informações
	Síntese das informações
Sumarização	Síntese dos resultados
	Especificação dos meios de disseminação
	Formatação e avaliação do relatório

(*) Atividades facultativas.

O StArt comporta a importação de resultados de pesquisas de busca de diferentes bases de dados, como *PubMed*, *Springer*, *Scielo*, *Google Academic*, *Web of Science* e *Scopus*. Em relação ao formato dos resultados de busca, é possível trabalhar com arquivos no formato *BibTeX*, *MEDLINE*, *RIS* e *Cochrane*.

2.4.1 Aplicação da RS

O objetivo da RSL da pesquisa em questão consiste em compreender o estado da arte em relação à identificação de áreas mais favoráveis à implantação de traçados de adutoras de água por meio de um modelo multicritério baseado em um Sistema de Informações Geográficas e otimização de rotas.

A pesquisa busca mapear quais são os métodos mais eficazes e as melhores práticas referentes à temática em questão. A construção dessa pesquisa foi realizada a partir das bases de dados *Web of Science* e *Scopus*. Após testagens do formato de pesquisa, foi aplicado, em ambas as plataformas, a seguinte *string* de busca que apresentou maior quantidade de resultados: “*water*” *AND* (“*pipelines*” *OR* “*lines*” *OR* “*supply pipelines*”) *AND* “*GIS*”. Além da *string*, foram aplicados filtros de categoria.

Na base da *Web of Science* foram consideradas as categorias “*Environmental Sciences, Water Resources, Geosciences Multidisciplinary, Engineering Civil, Remote Sensing, Engineering Environmental, Environmental Studies, Engineering Geological, Green Sustainable Science Technology, Computer Science Interdisciplinary Applications, Computer Science Information Systems, Regional Urban Planning*”.

Já na base *Scopus* considerou-se as categorias “*Environmental Science, Earth and Planetary Sciences, Agricultural and Biological Sciences, Engineering, Computer Science, Decision Sciences*”. Em ambas as bases foi aplicado um filtro para retornar apenas pesquisas em formato de artigos. O resultado da pesquisa na base *Web of Science* retornou 168 artigos, enquanto a base *Scopus* gerou 1.326 resultados. Os resultados foram extraídos das bases no formato *BibTex*, sendo foram considerados exclusivamente trabalhos nas línguas portuguesa e inglesa.

Na fase de planejamento da RSL no *StArt*, é construído o protocolo de revisão, sendo definido uma gama de critérios de avaliação e filtros para triagem da base de dados coletada. Foram exploradas variações e derivações das palavras-chave com o intuito de cobrir uma vasta amplitude de dados, a exemplo:

- | | | |
|---|----------------------------------|--------------------------------|
| • <i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i> | • <i>MCDM</i> | • <i>decision support</i> |
| • <i>Delphi Method</i> | • <i>Multi-criteria Decision</i> | • <i>optimization</i> |
| • <i>Geographic Information Systems (GIS)</i> | • <i>Multicriteria Decision</i> | • <i>route</i> |
| • <i>Geoprocessing</i> | • <i>Multicriteria analysis</i> | • <i>routing</i> |
| • <i>Least Cost</i> | • <i>algorithm</i> | • <i>supply pipeline</i> |
| | | • <i>water pipeline</i> |
| | | • <i>water supply pipeline</i> |

Em seguida, na fase de execução, foram aplicados os arquivos resultantes das consultas nas bases citadas em formato *BibTex* e excluídos, de forma automatizada, os artigos em duplicatas. Ao fim dessa depuração, foram removidos 584 artigos duplicados. Os 910 artigos restantes foram ordenados pelo *score* e seus quadrantes.

O programa *StArt* utiliza um sistema de pontuação para avaliar a relevância dos artigos, chamado de *score*. A pontuação é calculada com base em diversos critérios, como a similaridade do título e resumo do artigo com a pergunta de pesquisa, a presença de palavras-

chave relevantes, a qualidade metodológica do estudo e o impacto do artigo na comunidade científica. O programa faz uso de um algoritmo complexo para combinar esses fatores e calcular o valor numérico de *score* para cada artigo.

Quanto aos quadrantes, os artigos são divididos em quatro quadrantes, com base em seu *score* e na citação do artigo em questão em demais artigos da base consultada. Os quadrantes são classificados da seguinte maneira:

- Quadrante 1: Artigos com alto *score* e pelo menos uma citação.
- Quadrante 2: Artigos com alto *score* e sem citação.
- Quadrante 3: Artigos com baixo *score* e pelo menos uma citação.
- Quadrante 4: Artigos com baixo *score* e sem citação.

Posteriormente o ordenamento dos artigos por suas pontuações, observou-se que todos os trabalhos se dividiam entre o quadrante 2 e 4, ou seja, não há citação entre os artigos consultados. Os trinta primeiros estudos foram selecionados para uma triagem supervisionada, chamada de leitura dinâmica, na qual o pesquisador avaliou os títulos, resumos e palavras-chaves dos trabalhos e analisou se o documento está em consonância com os objetivos da revisão sistemática.

Após a leitura dinâmica, foram selecionados seis artigos (Amaral; Cirilo; Ribeiro Neto, 2020; González-Pavón *et al.*, 2024; Jankowski; Richard, 1994; Motiee *et al.*, 2023; Raj; Bansal, 2023; Yildirim *et al.*, 2016). De forma a enriquecer o corpo de conhecimento, foram incluídos quatro trabalhos adicionais (Abudu; Williams, 2015; Macharia; Wathuo; Mundia, 2015; Nonis; Varghese; Suresh, 2007; Wang *et al.*, 2022), selecionados a partir da revisão das referências dos estudos obtidos através da metodologia descrita anteriormente.

A literatura aborda a aplicação de metodologias para o traçado otimizado não apenas para adutoras de água, mas também para outros tipos de dutos, como transporte de gás natural, petróleo e linhas de transmissão de energia. Logo, trabalhos que abordam essas temáticas foram incorporados na revisão. A Tabela 5 apresenta os trabalhos considerados na revisão sistêmica.

Tabela 5 - Artigos Selecionados para Revisão Sistemática.

Autoria	Título	Metodologia	Área de Estudo
Jankowski e Richard (1994)	<i>Integration of GIS-based suitability analysis and multicriteria evaluation in a spatial decision support system for route selection</i>	GIS + Análise Multicritérios	Estados Unidos
Nonis <i>et al.</i> (2007)	<i>Investigation of an AHP based multi criteria weighting scheme for GIS routing of cross country pipeline projects</i>	GIS + Consulta a especialistas + Análise Multicritérios	Índia
Abudu e Williams (2015)	<i>GIS-based Optimal Route Selection for Oil and Gas Pipelines in Uganda</i>	GIS + Consulta a especialistas + Análise Multicritérios + Algoritmo de busca geométrica	Uganda
Macharia <i>et al.</i> (2015)	<i>Experts' Responses Comparison in a GIS-AHP Oil Pipeline Route Optimization: A Statistical Approach</i>	Consulta a especialistas + Análise de Multicritérios	Quênia
Yildirim <i>et al.</i> (2016)	<i>An integrated spatial method for minimizing environmental damage of transmission pipelines</i>	GIS + Análise Multicritérios + Algoritmo de busca geométrica	Turquia
Amaral <i>et al.</i> (2020)	Uso de técnicas de geoprocessamento na otimização do traçado de sistemas adutores de abastecimento de água com a utilização de uma base de dados de alta definição	GIS + Consulta a especialistas + Análise Multicritérios + Algoritmo de busca geométrica	Brasil
Wang <i>et al.</i> (2022)	<i>Transmission line route planning based on AHP-ACO algorithm</i>	GIS + Consulta a especialistas + Análise Multicritérios + Algoritmo de busca geométrica	China
Motiee <i>et al.</i> (2023)	<i>A Decision Making Approach For Water Transfer Systems by Analytical Hierarchy Process (AHP) and GIS</i>	GIS + Consulta a especialistas + Análise Multicritérios	Irã
González-Pavón <i>et al.</i> (2024)	<i>Optimization of Collective Irrigation Network Layout through the Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) Multicriteria Analysis Method</i>	GIS + Consulta a especialistas + Análise Multicritérios + Algoritmo de busca geométrica	Espanha
Raj e Bansal (2024)	<i>Use of GIS for selection of optimal route for water pipelines in hill areas</i>	GIS + Consulta a especialistas + Análise Multicritérios + Algoritmo de busca geométrica	Índia

2.4.2 Estado da arte

A seguir são apresentados os trabalhos elencados, assim como suas metodologias e resultados.

Jankowski e Richard (1994) integraram SIG com avaliação multicritério para selecionar rotas em uma região com muitas áreas alagadas, cursos d'água e encostas íngremes no Condado de King, Washington, EUA. Utilizando programas como PC-ARC/INFO® 3.4D e BEST CHOICE, consideraram critérios como custo total, aquisição de direito de passagem, cursos d'água, áreas alagadas, acessibilidade e vulnerabilidade ao tráfego, risco de erosão e perigo sísmico. Três rodadas de avaliação, com diferentes pesos atribuídos aos critérios, resultaram em três alternativas. Os autores selecionaram a que mostrou menor vulnerabilidade a mudanças de peso nas áreas úmidas do que as demais. Eles destacaram a falta de integração de dados não espaciais e preferências dos decisores, indicando a necessidade de melhorias no processo de tomada de decisão em geoprocessamento, que foram solucionadas com avanços tecnológicos subsequentes.

Nonis, Varghese e Suresh (2007) destacam que ao traçar o caminho de um duto, busca-se maximizar os benefícios públicos enquanto se minimizam os impactos ambientais e sociais. Apresentam treze critérios a serem evitados no cenário indiano, incluindo áreas com declividades acentuadas, cruzamentos de estradas e ferrovias, cruzamentos de rios, áreas proibidas, florestas reservadas, áreas com alto custo de terra e tipos de solo desfavoráveis. A metodologia de integração de SIG e AHP foi implementada pela empresa *Larson & Toubro*, com a participação de três especialistas na definição das importâncias relativas de cada critério.

Os pesos foram calculados pela função *Visual Basic for Applications* (VBA) do Microsoft Excel, resultando em uma razão de inconsistência de 0,363, e os planos de informação foram combinados no programa ArcGIS 8.1 (Esri). A comparação entre a rota ponderada e a rota não ponderada mostrou que a metodologia corrige o traçado conforme os critérios, embora os autores reconheçam que uma avaliação mais detalhada do terreno é necessária para otimização total, concluindo que a metodologia é benéfica para apoio à tomada de decisão.

Abudu e Williams (2015) desenvolveram um modelo de decisão multicritério para otimização do traçado de um duto em Uganda, visando transportar óleo e gás das cidades de Hoima a Kampala. Os critérios foram agrupados em três campos: ambiental (minimização de riscos de contaminação e impactos ambientais), construção (uso de áreas de servidão e terras

de baixo custo) e segurança (acesso rápido às instalações e proteção das infraestruturas). A importância relativa de cada critério foi determinada através da Escala Fundamental de Saaty, respondida por 20 especialistas e referências literárias. Os traçados otimizados foram calculados pelo *Least Cost Path* do ArcGIS, avaliando também os custos das alternativas e diferentes diâmetros propostos pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e pela *Carnegie Mellon University* (CMU). Observou-se que todos os traçados calculados eram mais extensos que a proposta inicial do governo de Uganda, com a rota de construção sendo a mais econômica e viável. Concluiu-se que fatores socioeconômicos, sociopolíticos e religiosos, bem como informações sobre preços das terras, são essenciais na análise multicritério para roteamento de gasodutos.

Macharia, Wathuo e Mundia (2015) investigaram a correlação entre as respostas de especialistas de diferentes áreas em relação à ponderação de treze fatores influenciadores do traçado de um oleoduto no Quênia, utilizando uma abordagem estatística. Consultaram 50 indivíduos, entre eles, geoinformáticos, engenheiros civis, administradores locais, residentes da área, ambientalistas e especialistas da indústria de óleos. Usaram a matriz de comparação par a par com base na Escala Fundamental de Saaty para avaliar critérios como proximidade a assentamentos e reservas florestais, áreas alagadas, aquíferos, travessia de rios, terrenos agrícolas, declividade, geologia, ferrovias, rodovias e tipos de solos. As respostas foram analisadas estatisticamente com o programa STATA13.1 para identificar similaridades e variações, mostrando maior congruência entre geoinformáticos e 60% de concordância entre engenheiros civis, enquanto os outros grupos variaram. Concluiu-se a necessidade de buscar opiniões diversas e garantir respostas baseadas na experiência profissional para otimizar a tomada de decisão.

Yildirim *et al.* (2016) compararam a rota atual de uma tubulação de gás natural com uma rota otimizada, desenvolvida mediante uma metodologia baseada na integração de um modelo multicritério com um SIG na província de Rize na Turquia. Os autores criaram uma extensão chamada *Multicriteria Extension for Determining Environmentally Sensitive Pipeline Routes* (MEDES-PR) do ArcGIS 10.1 e consideraram critérios ambientais sensíveis, como uso do solo, tipos de solo e vegetação, rios, áreas protegidas, flora, fauna, lagos, população, declividade, geologia, rodovias, risco de avalanche e tipos de plantas. Os dados foram transformados em raster e reclassificados, e a superfície de custo acumulada foi calculada utilizando a metodologia *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*

(TOPSIS). A rota ótima foi determinada pelo algoritmo de Dijkstra na função *Least Cost Path Analysis* do ArcGIS (Esri). Os resultados indicaram que a metodologia é mais eficiente e sustentável que métodos tradicionais, sugerindo a criação de extensões SIG específicas e enfatizando a importância da qualidade dos dados para precisão dos resultados.

Amaral, Cirilo e Ribeiro Neto (2020) avaliaram o impacto da qualidade de uma base de dados em um modelo multicritério de otimização de traçados baseado em SIG. Utilizaram critérios como altimetria, declividade, proximidade de rios, áreas alagadas e rodovias, ponderados por especialistas via Método Delphi e padronizados por meio da utilização de funções lineares. O programa ArcGIS foi empregado para sobrepor os dados e gerar uma superfície de custo, na qual aplicaram o algoritmo de Dijkstra para obter o caminho ótimo. Compararam-se o traçado inicial do Governo Federal (56,08 km), uma rota otimizada com Modelo Digital de Elevação (MDE) da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM) de 30 m (55,16 km) e outra rota com MDE com base na tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) de 25 cm (58,30 km). A tecnologia LiDAR, apesar de demandar maior esforço computacional, proporcionou maior precisão nos resultados, sendo mais adequada ao estudo. Concluíram que a metodologia aplicada é favorável, resultando em traçados mais econômicos em termos de execução, manutenção e operação.

Wang *et al.* (2022) combinaram o uso de SIG, o método AHP, o algoritmo *Ant Colony Optimization* (ACO) e a linguagem Python para determinar a rota ótima de uma linha de transmissão em Guizhou, na China, uma região montanhosa. Os critérios foram transformados em raster e reclassificados de 1 a 5, conforme o grau de favorabilidade, com áreas restritas como reservas naturais sendo intransitáveis (valor 0). Os critérios, incluindo altimetria, declividade, rodovias, sistema de água, áreas residenciais e uso e cobertura da terra, foram ponderados por especialistas utilizando a Escala Fundamental de Saaty, e seus pesos atribuídos pelo processo analítico hierárquico ponderado por especialistas. Aplicaram então o algoritmo ACO, inspirado no comportamento de busca de formigas, que facilita auto-organização e computação paralela. Os autores afirmam que a metodologia torna o planejamento de linhas de transmissão mais científico e econômico, aumentando a eficiência do trabalho e fornecendo um guia de referência para estudos de roteamento.

Motiee *et al.* (2023) investigaram a otimização de rotas de adutoras de água na região árida de Kerman, Irã, visando transferir água desalinizada do Golfo Pérsico para empresas locais. Utilizando o Método Delphi, consultaram 45 especialistas para selecionar critérios

relevantes como geomorfologia, geologia, hidrologia, impactos ambientais, cobertura do solo, acessibilidade, especificidades técnicas, impacto social, imperativos políticos, características hidráulicas, operação, durabilidade e defesa passiva. Esses critérios foram analisados pelo método AHP no programa *Expert Choice*, considerando aspectos técnicos, sociais, econômicos e ambientais. As variáveis foram sobrepostas em um SIG, resultando em duas rotas favoráveis. Os autores concluíram que a rota final deve ser escolhida por meio de visitas ao campo e análise de custo de construção.

González-Pavón *et al.* (2024) investigaram a definição de critérios objetivos para auxiliar na tomada de decisão durante a fase de projeto de tubulações de água pressurizada em redes de irrigação coletiva, utilizando AHP para avaliação de alternativas e o algoritmo de Dijkstra no QGIS 3.X para determinar o caminho de menor custo. A metodologia foi validada em doze estudos de caso em áreas de cultivo de citros na Comunidade Valenciana, Espanha. Cinco especialistas ponderaram critérios como tipos de rodovias, tipo de pavimento, obtenção de permissão e acessibilidade à rodovia. Os pesos foram calculados via AHP e sobrepostos em um SIG, gerando um raster com valores de resistência do caminho. Comparando os traçados calculados com um projeto externo, a metodologia apresentou uma economia média de 6,4%, com resultados mais promissores em áreas com maiores graus de resistência.

Raj e Bansal (2023) propuseram uma metodologia para selecionar a rota mais adequada para uma adutora de água no campus do Instituto Nacional de Tecnologia Hamirpur, na Índia. Os autores consideraram treze fatores, como declividade, aspecto (direção para a qual uma encosta está voltada), elevação, uso e cobertura da terra, áreas protegidas, redes de serviço, geologia, restrições subterrâneas, densidade populacional, parâmetros do duto, clima, áreas propensas a desastres e corpos d'água. O estudo visa conectar a adutora principal do sistema de abastecimento ao reservatório do campus, abrangendo uma área de aproximadamente 81 hectares, com um intervalo de altimetria de 818–892 m acima do nível do mar. Devido à complexidade da área, apenas os critérios de declividade, aspecto, elevação, uso e cobertura da terra, áreas protegidas, redes de serviço e restrições subterrâneas foram selecionados para análise do caminho otimizado da adutora. Os autores utilizaram o método AHP e consulta de especialistas para atribuir pesos relativos aos critérios e, em seguida, aplicaram um algoritmo para encontrar a rota otimizada. Conclui-se que a rota selecionada é amigável ao meio ambiente, reduzindo custos e minimizando perturbações nos recursos naturais e construídos.

Os trabalhos analisados apresentam a integração consistente entre SIG e o método de AHP para a ponderação de critérios, destacando a consulta a especialistas para fundamentar as decisões em cenários complexos de multicritérios. Essas consultas, realizadas por meio de entrevistas ou metodologias mais elaboradas como o método Delphi, proporcionam um suporte à definição de pesos relativos, de maneira a embasar as análises. A combinação dessas metodologias possibilitou que os estudos incorporassem perspectivas técnicas, sociais e econômicas relevantes aos contextos analisados.

Os objetos de análise variaram entre gasodutos (Abudu; Williams, 2015; Yildirim *et al.*, 2016), adutoras de água (Amaral; Cirilo; Ribeiro Neto, 2020; Raj; Bansal, 2023) e linhas de transmissão (Wang *et al.*, 2022), demonstrando a flexibilidade do modelo em atender demandas distintas de infraestrutura linear. Critérios como declividade, uso do solo, proximidade a cursos d'água e infraestrutura existente foram recorrentemente utilizados, alinhados ao objetivo comum de minimizar custos e impactos ambientais.

As metodologias se destacam pela aplicação de algoritmos de busca geométrica, como Dijkstra, ao buscar por precisão e eficiência nos resultados. Estudos como o de Jankowski e Richard (1994) evidenciaram a sensibilidade do modelo às ponderações aplicadas, enquanto Amaral, Cirilo e Ribeiro Neto (2020) enfatizam o impacto da qualidade dos dados. Trabalhos como o de González-Pavón *et al.* (2024) demonstraram a importância de validações práticas em múltiplos estudos de caso, aprimorando a confiabilidade das rotas propostas.

As diferenças entre os trabalhos refletem suas condições regionais e critérios específicos. Diante diferentes contextos e realidades, os critérios foram adaptados às demandas locais, demonstrando a adaptabilidade do SIG e dos métodos de ponderação. A integração de consultas a especialistas, alinhada a análises espaciais, reforça o potencial dessas metodologias em solucionar problemas complexos, otimizando rotas e minimizando impactos em diferentes cenários.

A Tabela 6 a seguir mostra os objetos de estudo, critérios selecionados e os pesos atribuídos a eles nos artigos selecionados na RSL, todavia alguns dos trabalhos não permitiram a extração de tais informações.

Tabela 6 – Critérios e Pesos dos Artigos da RSL.

Autoria	Objeto de estudo	Critérios	Pesos		
			1º rodada	2º rodada	3º rodada
Jankowski e Richard (1994)	Adutora de água	Áreas úmidas	0,125	0,045	0,170
		Rios	0,125	0,022	0,130
		Áreas de risco de erosão	0,125	0,050	0,125
		Áreas de risco sísmico	0,125	0,050	0,125
		Declives acentuados	0,125	0,050	0,125
		Acessibilidade/vulnerabilidade a danos causados pelo tráfego	0,125	0,050	0,125
		Comprimento da rota	0,125	0,300	0,100
		Aquisição de direito de passagem	0,125	0,133	0,050
		Custo	0,125	0,300	0,050
Autoria	Objeto de estudo	Critérios	Pesos		
			1º rodada	2º rodada	
Nonis <i>et al.</i> (2007)	Adutora de água	Floresta	0,091	0,216	
		Áreas proibidas	0,091	0,212	
		Rios	0,091	0,133	
		Ferrovias	0,091	0,104	
		Custo de terra	0,091	0,103	
		Estrada nacional	0,091	0,071	
		Solo	0,091	0,065	
		Declividade	0,091	0,046	
		Estrada metálica	0,091	0,030	
		Estrada não metálica	0,091	0,012	
		Estradas de Carros	0,091	0,010	
Autoria	Objeto de estudo	Critérios	Pesos		
Yildirim <i>et al.</i> (2016)	Gasoduto	Uso e cobertura da terra	0,179		
		Solo	0,166		
		Rios	0,145		
		Tipo de Floresta	0,138		
		Áreas Historicamente Protegidas	0,100		
		Flora-Fauna	0,081		
		Lago	0,069		
		População	0,033		
		Declividade	0,027		
		Geologia	0,019		
		Estrada	0,018		
		Avalanche	0,015		
		Tipos de planta	0,010		

Tabela 6 – Critérios e Pesos dos Artigos da RSL (Continuação).

Autoria	Objeto de estudo	Critérios	Pesos
Amaral <i>et al.</i> (2020)	Adutora de água	Altimetria	0,570
		Rodovias	0,220
		Declividade	0,150
		Rios	0,060
Autoria	Objeto de estudo	Critérios	Pesos
Wang <i>et al.</i> (2022)	Linha de Transmissão	Declividade	0,381
		Altimetria	0,250
		Estradas	0,159
		Área residencial	0,103
		Uso e cobertura da terra	0,061
		Sistema de água	0,046
Autoria	Objeto de estudo	Critérios	Pesos
Motiee <i>et al.</i> (2023)	Adutora de água	Efeitos sociais e políticos	0,224
		Geomorfologia e Geologia	0,161
		Defesa passiva	0,143
		Hidrologia e hidrogeologia	0,112
		Uso e cobertura da terra e Interações estruturais	0,112
		Operação e manutenção	0,078
		Características hidráulicas	0,059
		Acessibilidade	0,049
		Efeitos ambientais	0,039
		Especificações técnicas do duto	0,026
Autoria	Objeto de estudo	Critérios	Pesos
Raj e Bansal (2024)	Adutora de água	Altimetria	0,550
		Declividade	0,180
		Aspecto	0,150
		Uso e cobertura da terra	0,120

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão apresentados os instrumentos e recursos utilizados na pesquisa e a metodologia adotada para o seu desenvolvimento.

3.1 Caracterização das áreas de estudo

O estudo abrange duas áreas no estado do Rio de Janeiro (Figura 6). A Área de Estudo I, que envolve os municípios de Guapimirim, Itaboraí e São Gonçalo, busca validar o modelo comparando-o ao sistema adutor existente (Adutora Laranjal). Já a Área de Estudo II, que se refere aos municípios de Silva Jardim, Rio Bonito, Tanguá, Itaboraí e São Gonçalo, configura a área de aplicação final do modelo para o prognóstico de um sistema adutor de água da Lagoa de Juturnaíba até a ETA Laranjal.

3.1.1 Área de Estudo I – Sistema Imunana-Laranjal

O Sistema Imunana-Laranjal abastece os municípios Itaboraí, São Gonçalo, Niterói, a Ilha de Paquetá e os distritos de Inoã e Itaipuaçu (em Maricá), totalizando quase 2 milhões de pessoas, segundo a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE). Os Rios Macacu e Guapi-Açu localizados de Região Hidrográfica da Baía de Guanabara (RH-V) formam o manancial superficial do Canal de Imunana, localizado em Guapimirim (Figura 7), onde ocorre a captação de água (LabHid-Coppe/UFRJ, 2014).

O sistema é operado pela CEDAE que fornece água tratada a partir da Estação de Tratamento de Água Laranjal, localizada em São Gonçalo, com capacidade de projeto de 7,0 m³/s, embora opere atualmente com 5,5 m³/s. Calcula-se que a demanda atual da ETA é da ordem de 7,7 m³/s, logo o sistema urge por uma ampliação na produção de água em 2,2 m³/s. A previsão da demanda para atendimento das localidades em 2030 é de 12,5 m³/s, sendo necessário a ampliação de mais 7 m³/s (LabHid-Coppe/UFRJ, 2014).

Apesar da CEDAE operar a ETA Laranjal, a distribuição da água é realizada por concessionárias privadas que são responsáveis pela operação e manutenção do sistema. Niterói é atendida pela Águas de Niterói e os demais municípios e a Ilha de Paquetá são atendidos pela concessionária Águas do Rio (CEDAE, 2025).

A Área de Estudo I (Figura 7) abrange os municípios de Guapimirim, Itaboraí e São Gonçalo, onde está localizada a Adutora Laranjal, com 18,63 km de extensão, conectando o Canal de Imunana à ETA Laranjal. A Figura 8 apresenta os dados de entrada para a área de estudo.

A Área de Estudo I apresenta uma variação altimétrica de 0 a 2.200 m, no entanto a oscilação de altimetria mais expressiva ocorre no norte da área, fora do espaço compreendido entre os pontos da Captação Laranjal e da ETA Laranjal. O mesmo acontece em relação a declividade, onde esse espaço apresenta um indicador máximo de 50%. Em relação às rodovias, observa-se uma densidade grande de vias que cruzam a Área de Estudo I, sobre tudo é possível visualizar vias que se encontram entre os pontos de interesse. Em relação a hidrografia, há uma densidade de drenagem relativamente grande, assim como em cursos d'água de ordem 1 e 2. Acerca do uso e cobertura da terra, o mosaico de usos é bem diverso, com destaque para áreas urbanizadas seguida de formações florestais, mangues e campos alagados. Os solos de maior presença entre os pontos de interesse são gleissolo e solo misto de área urbanizada.

A Adutora Laranjal foi implantada na década de 1940. Não foi possível acessar o projeto original de concepção da infraestrutura, o que impede a identificação dos critérios técnicos considerados na época. Diante disso, o traçado existente não é assumido como uma rota ótima, sobretudo por ter sido desenvolvido em um período em que importantes recursos e ferramentas de concepção de obras lineares de engenharia não estavam disponíveis. Ainda assim, sua configuração espacial representa um importante parâmetro de conferência para os resultados obtidos na pesquisa.

Nesse contexto, a Área de Estudo I foi utilizada como campo de validação do modelo, uma vez que abriga o traçado da adutora existente. Essa estratégia busca compensar a ausência de dados históricos com uma metodologia de validação empírica, assumindo a adutora existente como um indicativo possível, ainda que não ideal, para fins comparativos.

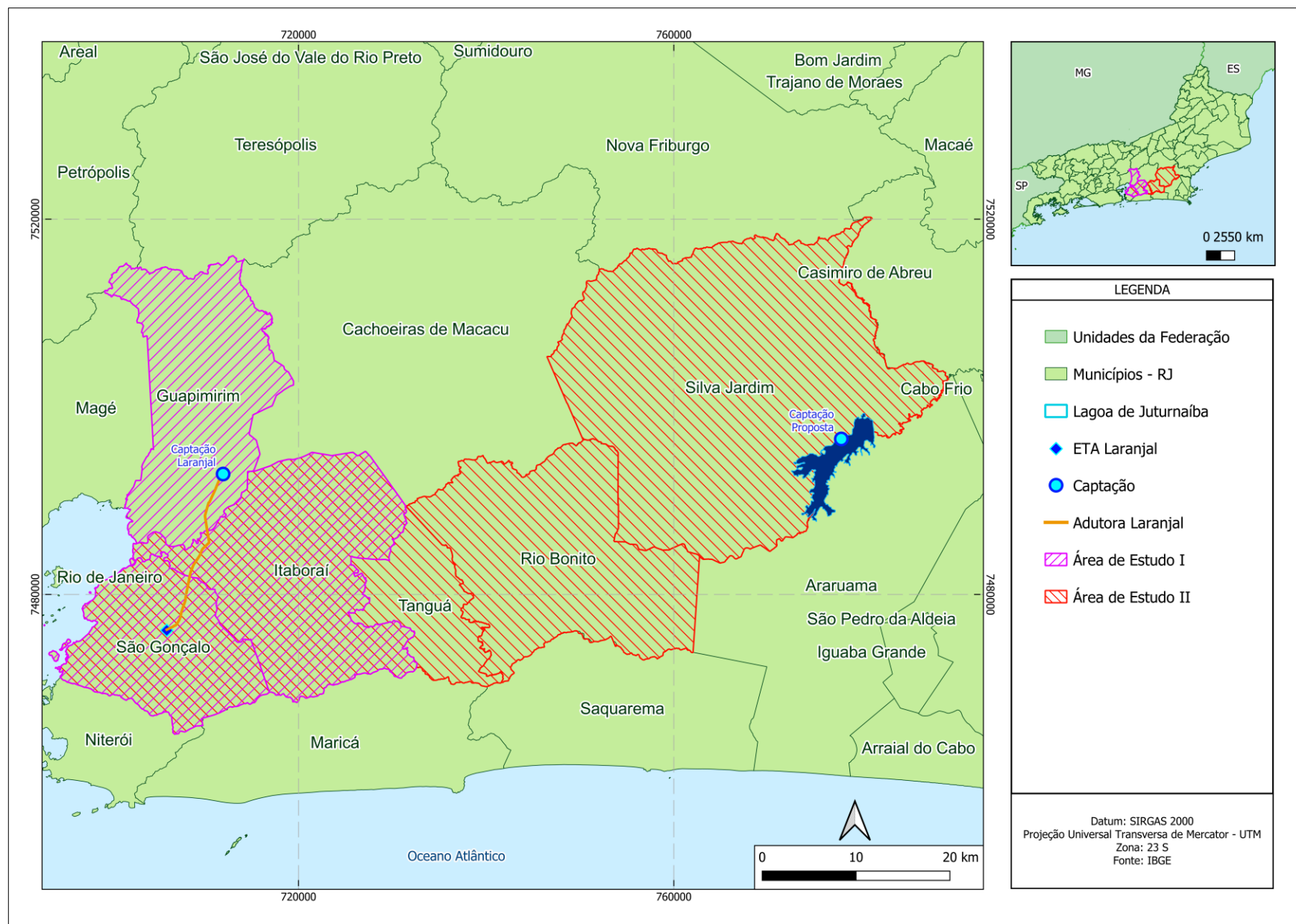


Figura 6 –Áreas de Estudo I e II.

ÁREA DE ESTUDO I - SISTEMA IMUNANA-LARANJAL

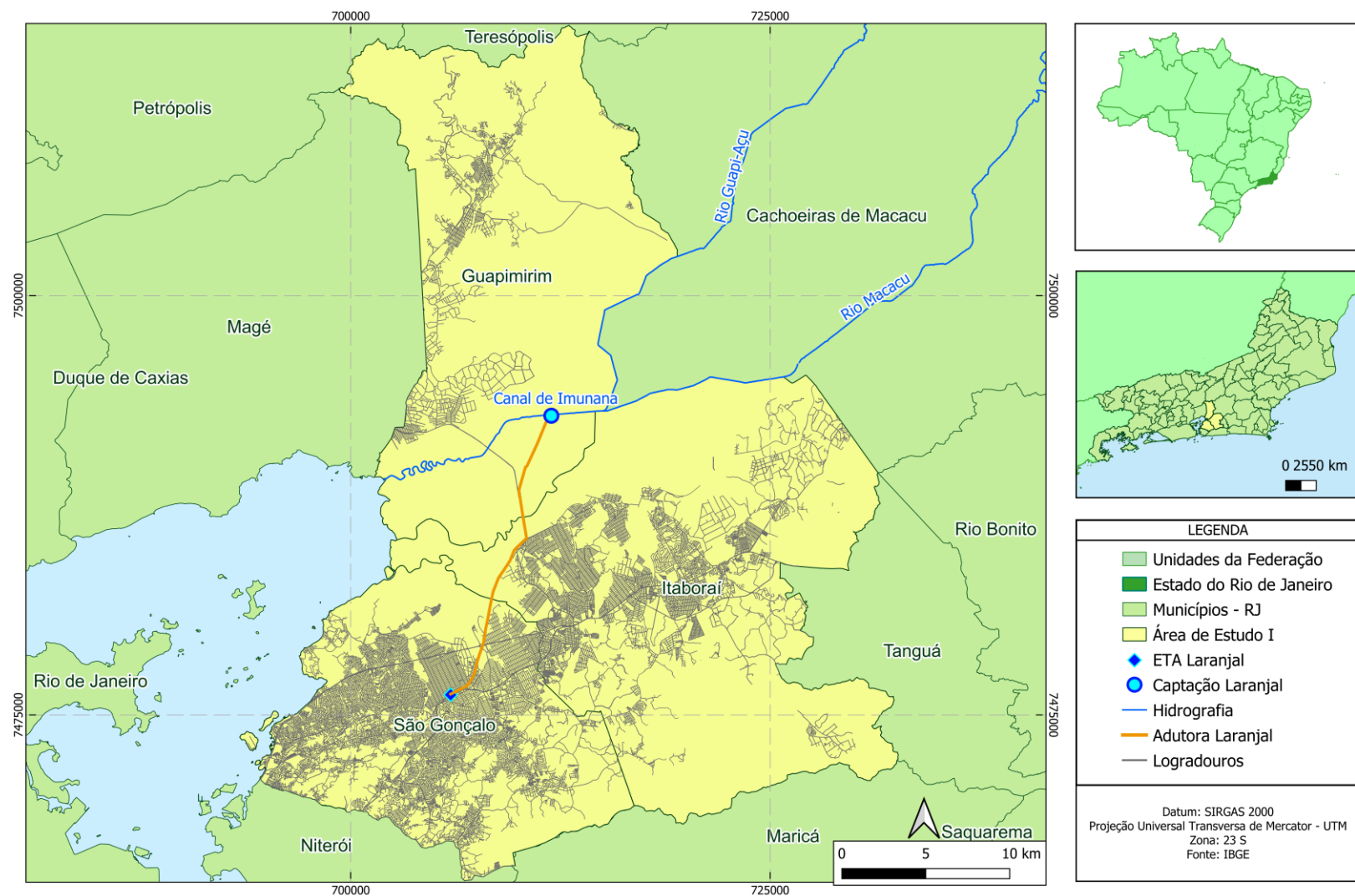


Figura 7 –Localização da Área de Estudo I.

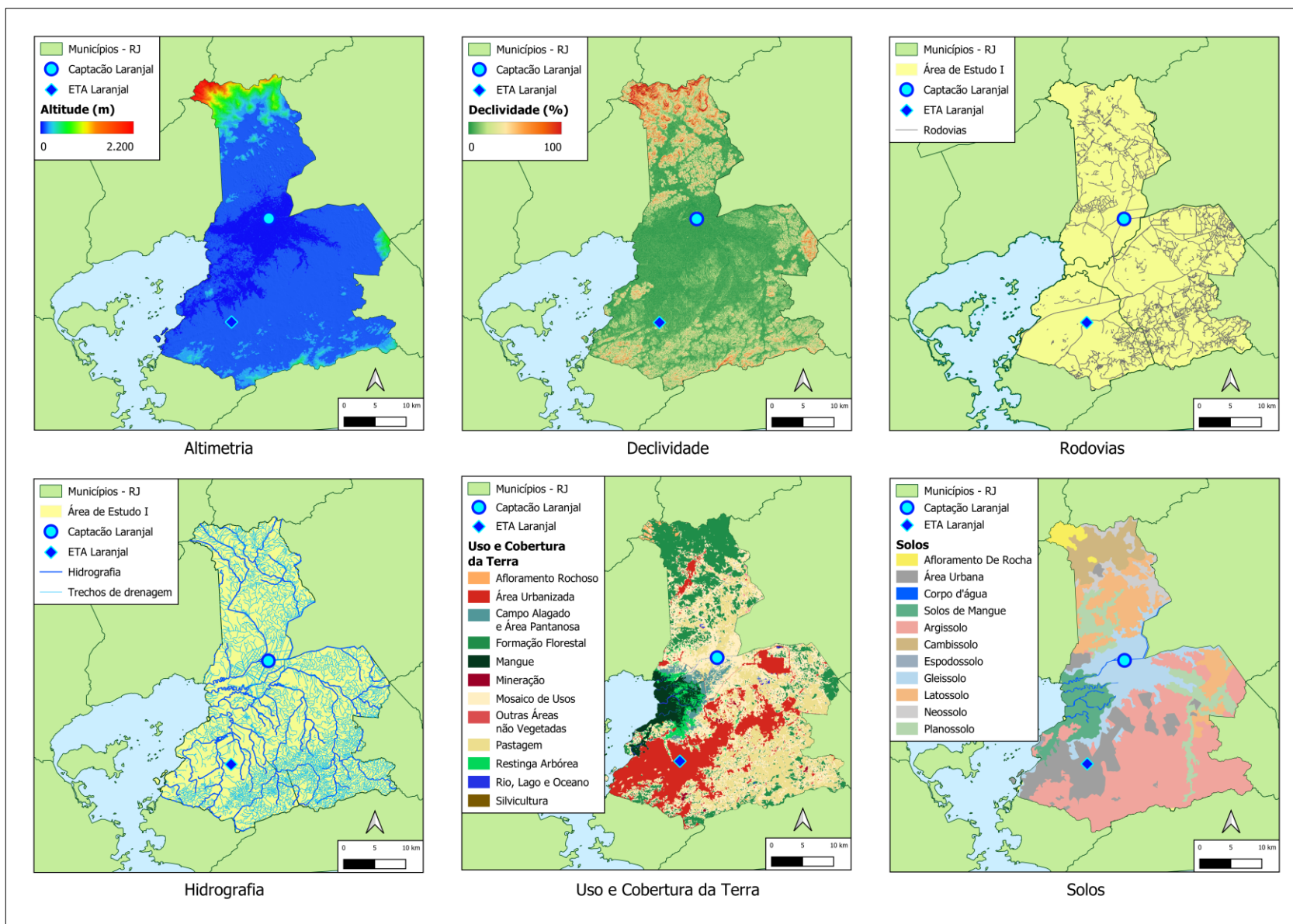


Figura 8 – Dados de Entrada - Área de Estudo I.

3.1.2 Área de Estudo II – Sistema de Ampliação Proposto

A região metropolitana do Rio de Janeiro é predominantemente abastecida pelos Sistemas Leste (SIN Imunana/Laranjal) e Oeste (SIN Guandu/Lajes/Acari), sendo este último caracterizado por sua complexidade e estabilidade estrutural. Entretanto, os municípios que compõem o sistema Leste têm histórico de insegurança hídrica, resultado de períodos de estiagem e problemas na gestão de recursos hídricos, refletindo uma escassez hidrossocial decorrente de deficiências no sistema de abastecimento público e na administração dos serviços, influenciados pelo poder econômico (Britto; Johnsson; Carneiro, 2016; Garcia de Gouveia, 2022).

Diante o exposto, alternativas para o reforço do abastecimento de água para a região leste da Baía de Guanabara são avaliadas, como as propostas de barragem do Rio Guapi-Açu e do Rio Grande, interligação de água tratada entre os sistemas Guandu e Imunana-Laranjal e a captação de água nos reservatórios de Lajes e da Lagoa de Juturnaíba (LabHid-Coppe/UFRJ, 2014; Pereira; Canedo; Capodeferro, 2022).

De forma a estudar a ampliação do sistema de abastecimento do Leste Metropolitano do Rio de Janeiro, o presente estudo considera a alternativa da captação de água na Lagoa de Juturnaíba, localizada entre os municípios fluminenses de Silva Jardim e Araruama, e busca determinar uma rota otimizada para esse sistema adutor proposto.

A adutora proposta tem como origem um ponto situado no braço esquerdo da Lagoa de Juturnaíba, avaliado pela CEDAE como local em potencial para captação de água de acordo com a base de dados do Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Já o ponto de destino é representado pela ETA Laranjal, conforme o Relatório de Identificação de Obras do Atlas Água da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021).

Ao traçar uma reta entre a Lagoa de Juturnaíba e a ETA Laranjal obtém-se uma distância de aproximadamente 80 km. A Área de Estudo II configura-se pelos municípios de Silva Jardim, Rio Bonito, Tanguá, Itaboraí e São Gonçalo, cujas extensões são atravessadas por essa reta (Figura 9). A Figura 10 os dados de entrada da área de estudo.

ÁREA DE ESTUDO II - SISTEMA DE AMPLIAÇÃO PROPOSTO

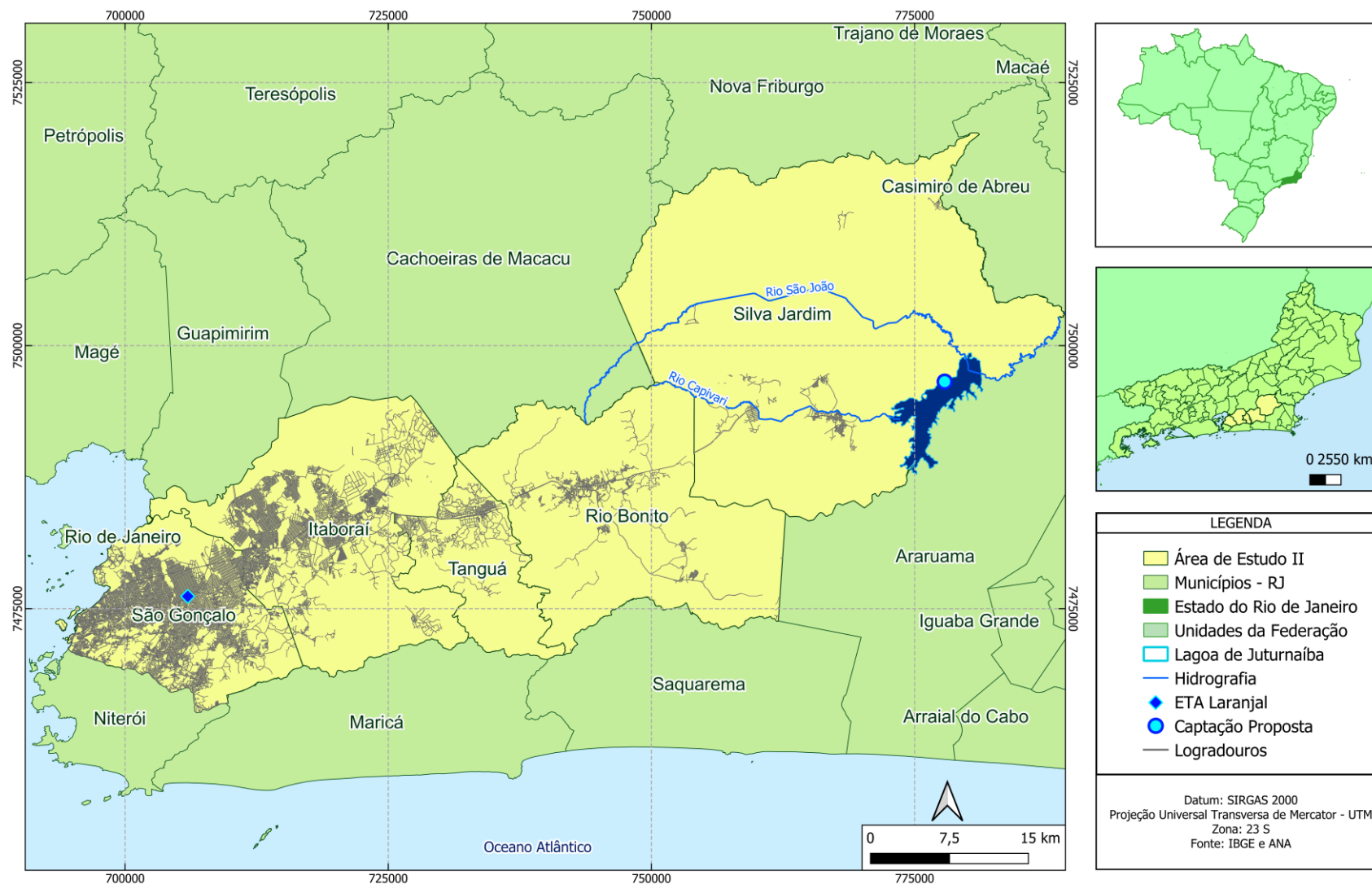


Figura 9 – Localização da Área de Estudo II

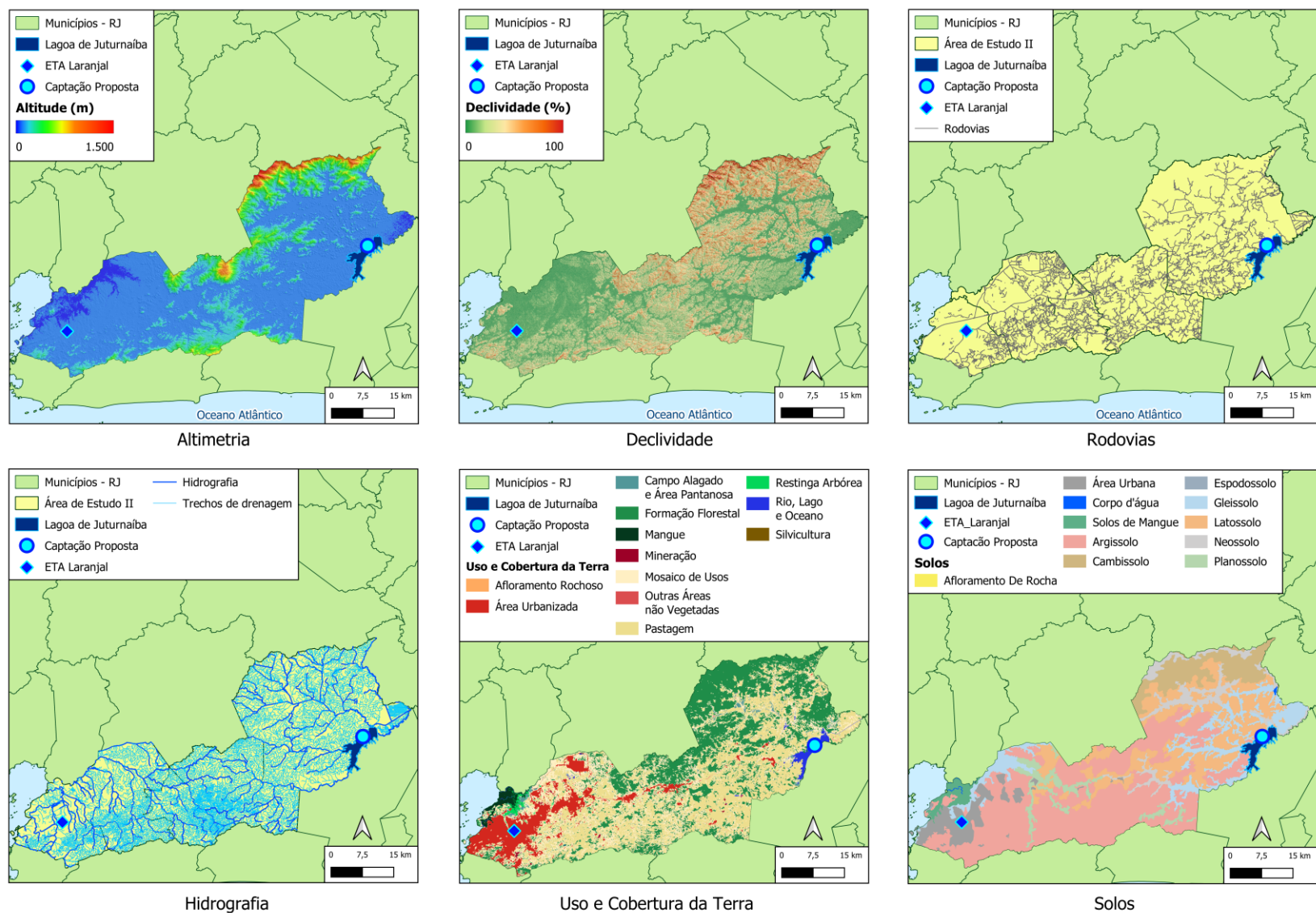


Figura 10 – Dados de entrada - Área de Estudo II.

A Área de Estudo II apresenta uma variação altimétrica de 0 a 1.500 m, no entanto a maior oscilação acontece fora do espaço compreendido entre os pontos da Captação Proposto e a ETA Laranjal. Em relação a declividade, é possível identificar locais com variações de 0 a 100% entre esses pontos. A densidade de rodovias é bastante expressiva, apresentando diversos caminhos em potencial. A hidrografia, da mesma forma é muito presente e ramificada, desde trechos de drenagem até os cursos d'água de ordem 1 e 2. O mosaico de uso e cobertura da terra destaca a presença de áreas urbanas, pastagem e formação florestal. Enquanto os solos mais presentes são argissolo e neossolo.

3.1.2.1 Manancial Lagoa de Juturnaíba

A Lagoa de Juturnaíba, localizada entre os municípios de Silva Jardim e Araruama, desempenha um papel fundamental como fonte de abastecimento de água para os municípios situados na Baixada Litorânea do estado do Rio de Janeiro, uma área amplamente conhecida como a Região dos Lagos (INEA-RJ, 2018).

A partir de 1974, o extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS) realizou diversas obras hidráulicas em nome do Programa Especial para o Norte Fluminense, do Ministério Interior. O Rio São João, principal afluente da Lagoa de Juturnaíba, foi represado com o intuito de possibilitar o abastecimento público e irrigação na região e a sua área alagada passou de 8 km² para 43 km², ao receber águas dos rios São João, Bacaxá e Capivari (Bidegain; Pereira, 2005; Noronha, 2009).

Na região, estão localizados pontos de captação de água tanto diretamente do reservatório quanto de seus afluentes, sob a gestão de diferentes concessionárias, conforme detalhado na Tabela 7. As concessionárias privadas Águas de Juturnaíba e Prolagos operam desde 1998 no reservatório (Bidegain; Pereira, 2005).

A Bacia Hidrográfica da Lagoa de Juturnaíba (BHLJ - Figura 11) está localizada na Bacia do Rio São João, na Unidade de Planejamento Hidrológico (UHP) VI-a1, que compreende o trecho a montante da represa. A delimitação da bacia foi feita por meio de técnicas de geoprocessamento, sendo definido o exutório como o ponto imediatamente a montante da represa.

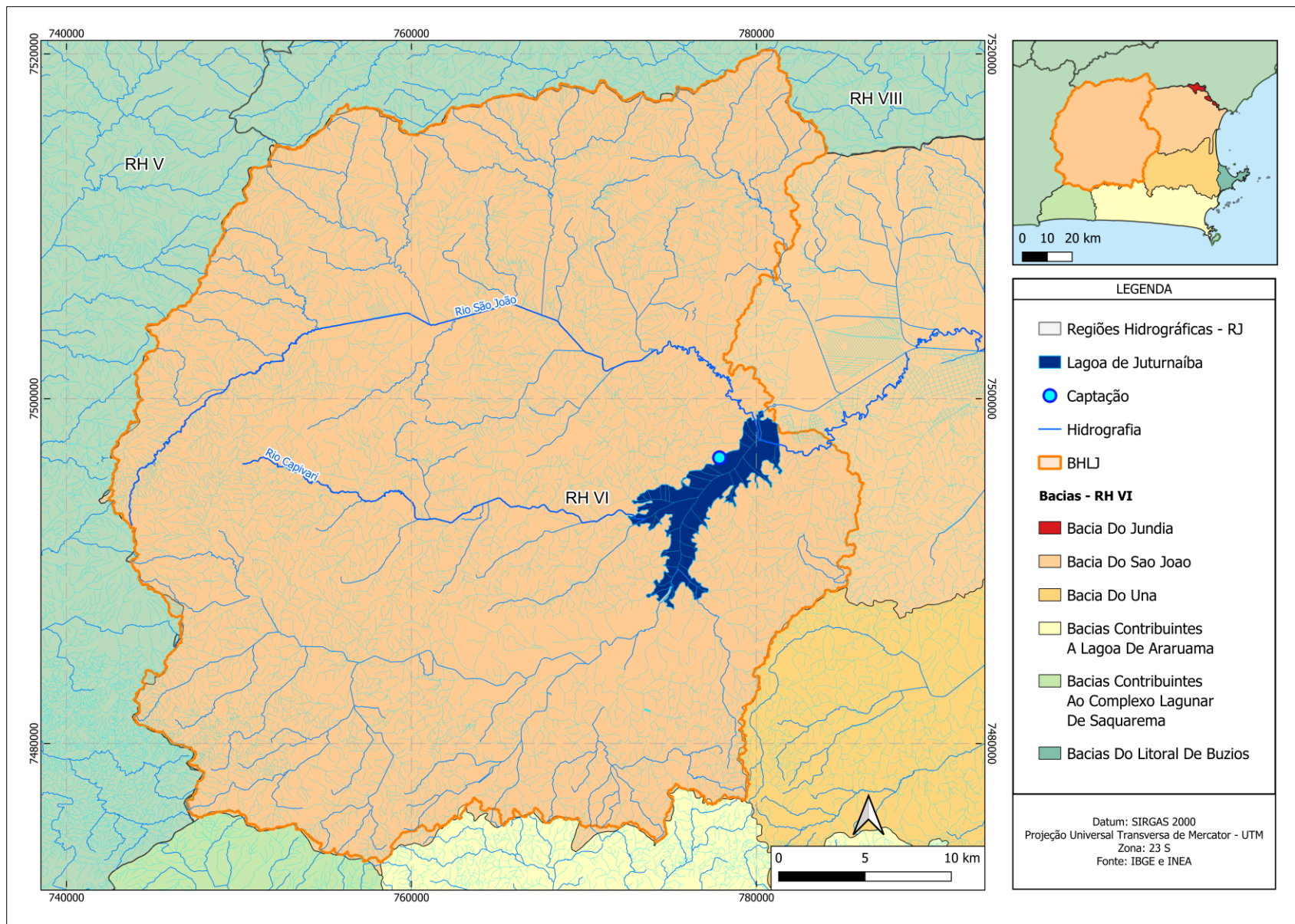


Figura 11 – Bacia da Lagoa de Juturnaíba.

Tabela 7 - Sistemas de Abastecimento na Lagoa de Juturnaíba e Afluentes.

Sistema de Abastecimento	Municípios Atendidos	Manancial	Tipo de sistema	Operadora	Vazão aduzida (l/s)	População atendida (hab)
Sistema Águas de Juturnaíba	Araruama, Silva Jardim e Saquarema	Lagoa de Juturnaíba	Integrado	Águas de Juturnaíba	1.100	339.164
Sistema Prolagos	Armação de Búzios, Arraial do Cabo, Iguaba Grande, São Pedro da Aldeia e Cabo Frio	Lagoa de Juturnaíba	Integrado	Prolagos	1.120	823.413 (população residente + flutuante)
Sistema Rio Bonito	Rio Bonito	Rio Bacaxá	Isolado	CEDAE	165	40.961

Fonte: INEA-RJ (2018); PMSB - Rio Bonito (2013).

A viabilidade de realizar a captação de água na Lagoa de Juturnaíba para suprir a demanda da Região do Leste Metropolitano do Rio de Janeiro depende, antes de tudo, da avaliação da disponibilidade hídrica do reservatório. Conforme estabelecido no Plano Estadual de Recursos Hídricos (LabHid-Coppe/UFRJ, 2014), a disponibilidade de água nos rios da RH-VI foi definida, de acordo a Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 - Disponibilidade Hídrica – RH VI.

RH	UHP	Nome	Área (km ²)	Q _{7,10} (m ³ /s)	Q _{95%} (m ³ /s)	Q _{MLT} (m ³ /s)
RH-VI	VI-a1	Rio São João (montante Juturnaíba)	1.341,00	9,1	16	64,4
	VI-a2	Rio São João (jusante Juturnaíba)	817,5	5,5	9,8	39,3
	VI-b	Rio Una	451	3,1	5,4	21,7
	VI-c	Búzios, Lagoas Saquarema, Jaconé e Araruama	1.030,30	7	12,3	49,5

Fonte: (LabHid-Coppe/UFRJ, 2014)

A $Q_{95\%}$ representa a vazão de permanência de 95% do tempo, ou seja, é a vazão mínima que se espera manter em um curso d'água durante 95% do ano, considerando um histórico de dados hidrológicos. É uma medida conservadora usada para gestão de recursos hídricos, especialmente para avaliar segurança hídrica e outorgas.

A determinação da vazão $Q_{95\%}$ da Bacia da Lagoa de Juturnaíba (BHLJ) foi realizada a partir da vazão específica da Unidade de Planejamento Hidrográfico VI-a1, correspondente ao trecho montante da represa. Essa vazão específica, calculada com base no valor de $16,0 \text{ m}^3/\text{s}$ para uma área de 1.341 km^2 , foi aplicada à área total da BHLJ, de $1.444,64 \text{ km}^2$, resultando em uma estimativa de $Q_{95\%}$ de aproximadamente $17,23 \text{ m}^3/\text{s}$. Considerando os critérios do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), a vazão outorgável foi definida como 40% desse valor, totalizando $6,89 \text{ m}^3/\text{s}$ disponíveis para captação. Após contabilizar os usos já existentes, como Prolagos, Águas de Juturnaíba e o Sistema Lavras e Rio Bonito, restam ainda $4,51 \text{ m}^3/\text{s}$ de disponibilidade hídrica na bacia, garantindo margem para novas captações sem comprometer a segurança hídrica regional (Tabela 9).

Tabela 9 - Disponibilidade Hídrica da BHLJ.

Área (km^2)	Q outorgável 40% ₉₅	Prolagos (m^3/s)	Águas de Juturnaíba (m^3/s)	Sistema Lavras e Rio Bonito (m^3/s)	Disponível (m^3/s)
1.444,64	6,89	1,12	1,1	0,17	4,51

Pereira; Canedo e Capodeferro (2022) simularam um modelo hidrodinâmico Quasi-Bidimensional (MOD-CEL) a fim de verificar a disponibilidade hídrica da Lagoa de Juturnaíba para além das retiradas já feitas para o atendimento da Região dos Lagos. Simulou-se um modelo hidrodinâmico para a bacia hidrográfica do Rio São João, para o reservatório e para o sistema vertedouro do reservatório.

Segundo os autores, o modelo aplicado teve caráter conservador e, mesmo considerando a retirada de $3 \text{ m}^3/\text{s}$ para a Região dos Lagos, constatou uma folga de até $5 \text{ m}^3/\text{s}$ para demais uso, concluindo a possibilidade de adução para o reforço no abastecimento do leste metropolitano. O valor encontrado pelos autores está aproximado do valor estimado na presente pesquisa.

De acordo com o Plano de Recursos Hídricos - RJ (2014), é necessária uma ampliação de 7 m³/s do SIN Imunana-Laranajl para suprir a demanda populacional até 2030. Percebe-se então que a disponibilidade hídrica da Lagoa de Juturnaíba não é suficiente para suprir sozinha a demanda estimada, contudo é capaz de contribuir para a ampliação e reforço do sistema.

3.2 Base de dados

A base de dados foi construída a partir de dados públicos disponíveis em portais de instituições ambientais e governamentais (Tabela 10). O modelo digital de elevação (MDE), gerado a partir da mesclagem de quatro cenas do satélite ALOS PALSAR 2 interpolado para 12,5m, disponível na plataforma da *Alaska Satellite Facilities*, possibilita a extração de informações de altimetria e declividade. O dado de uso e cobertura da terra foi adquirido no portal do MapBiomas, com imagens do satélite Sentinel-2 de resolução espacial de 10 metros.

Tabela 10 - Base de dados vetoriais.

Dado	Resolução	Fonte
Limites Estaduais e Municipais	1:250.000	IBGE
Uso e Cobertura da Terra (2022)	10 m	MapBiomas – Coleção 2 (beta)
Hidrografia	1:25.000	ANA
Rodovias	1:25.000	IBGE
Solos	1:100.000	EMBRAPA
Altitude e Declividade (MDE)	12,5 m	<i>Alaska Satellite Facilities</i>

3.3 Programas

O estudo se utiliza do *Quantum GIS* (QGIS 3.28), um programa livre e de código aberto de geoprocessamento. O QGIS é um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) e é licenciado pela Licença Pública Geral (GNU), além de ser um programa de destaque mundial por conta da sua facilidade de acesso e da ampla gestão do conhecimento quanto ao programa. O programa permite a manipulação e cruzamento de dados espaciais de variados formatos e fontes, e a criação de mapas temáticos a partir dos resultados gerados no manuseio das informações.

3.4 Metodologia

O fluxo metodológico do trabalho inclui levantamento de dados, pré-processamento, processamento, análise e resultados (Figura 12). Os dados geográficos que representam os critérios de decisão são obtidos por meio de portais de agências governamentais e ambientais. O tratamento dos dados envolve a reprojeção para o Datum SIRGAS 2000, Projeção UTM, Zona 23 Sul, correção de geometrias, mesclagem de camadas *rasters*, *buffers* e *rasterização* de camadas vetoriais considerando o tamanho do pixel de 10 metros, resultando em Plano de Informação (PI) referente aos critérios de decisão. Os PI são padronizados por meio da reclassificação de acordo com seus atributos.

Realiza-se uma revisão da literatura e consulta a especialistas para a validação dos critérios de análise selecionados e posteriormente a determinação de suas importâncias relativas. O processo de ponderação se dá por meio da aplicação do método AHP, aplicando-se três abordagens distintas:

- 1 – Pesos Iguais,
- 2 – Análise Hierárquica de Processos,
- 3 – Pesos Inversos.

Assim são gerados três conjuntos de valores para os pesos de cada critério, utilizados no processo de sobreposição ponderada, onde é aplicado a metodologia de álgebra de mapas por meio da calculadora *raster* para a geração de uma camada única chamada de superfície de custo, que reflete a contribuição relativa de cada fator considerado. Nas três superfícies de custo, calculadas para cada abordagem de ponderação, emprega-se o algoritmo de busca geométrica de Dijkstra para determinação da rota de menor custo dentro do respectivo contexto.

Os traçados foram avaliados com base em indicadores que possibilitam uma análise integrada e abrangente das rotas, incluindo a Distância de Hausdorff, a extensão total percorrida, o perfil de favorabilidade e as medidas estatísticas relacionadas aos valores dos pixels das superfícies de custo ao longo dos caminhos gerados.

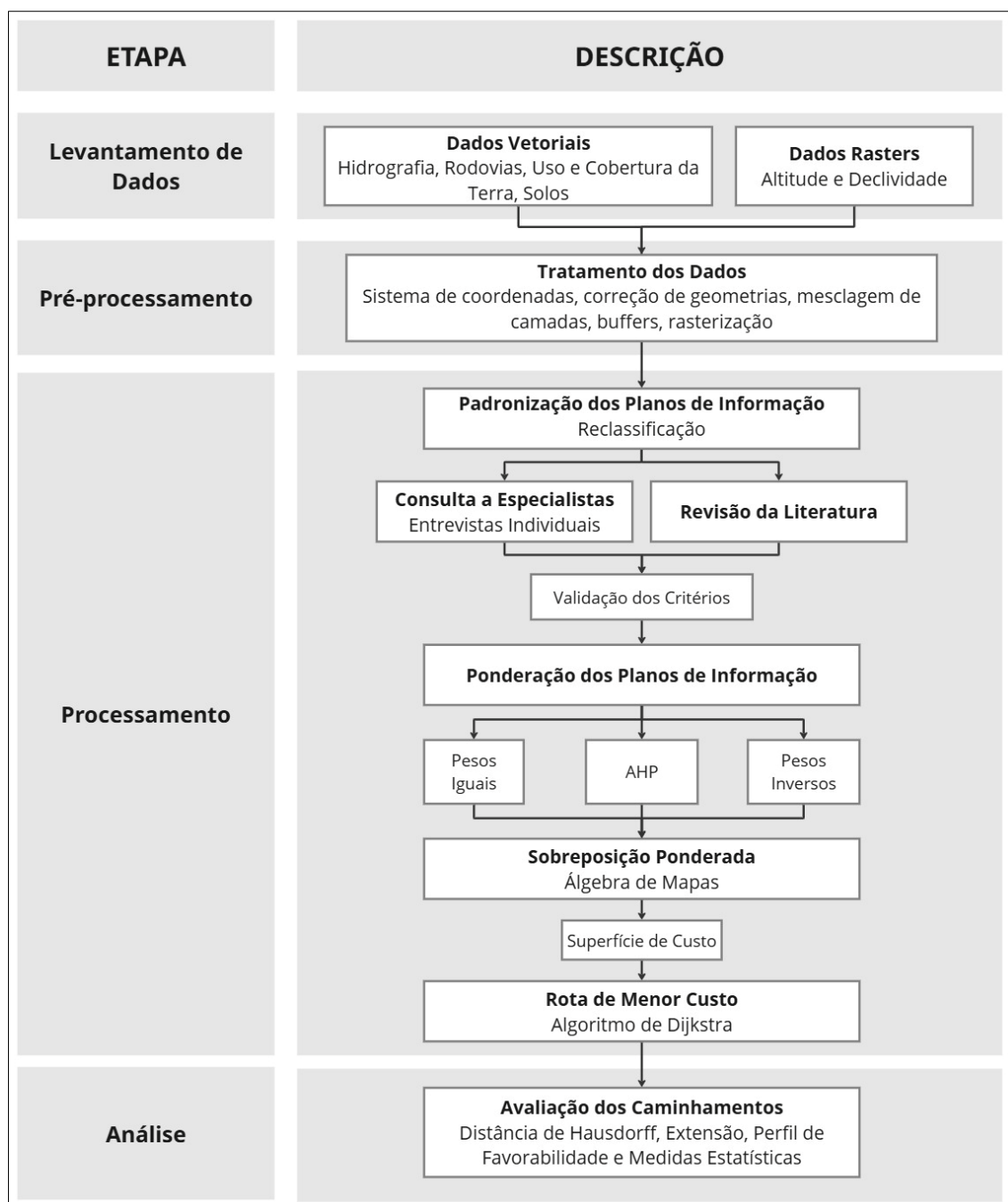


Figura 12 – Fluxograma metodológico.

3.4.1 Critérios de decisão

Existe uma série de fatores que podem influenciar o traçado de adutoras, a depender dos contextos ambiental e urbanístico envolvidos. O presente estudo avaliou e elencou alguns como mais importantes para a tomada de decisão, com base em estudos desenvolvidos em circunstâncias similares e complementares, e os incorporou no modelo multicritério.

Amaral, Cirilo e Ribeiro Neto (2020) utilizam-se dos critérios de altimetria, declividade, proximidade às rodovias e distância aos cursos d'água em seu estudo. A pesquisa subsequente faz uso desses critérios e adiciona à análise outros critérios apontados na literatura, como uso e cobertura da terra e natureza dos solos com o intuito de enriquecer a metodologia (González-Pavón *et al.*, 2024; Motiee *et al.*, 2023; Raj; Bansal, 2023). A literatura justifica a seleção desses critérios de acordo com as argumentações apresentadas abaixo.

- **Altimetria:** desníveis entre pontos ao longo do trecho da adutora implicam no uso de bombeamento de água, e consequentemente, maior consumo de energia elétrica e desta forma, maior custo de operação. Assim, busca-se por terrenos com menores variações altimétricas a serem superadas.
- **Declividade:** áreas com altas declividades são inadequadas para o traçado de adutoras por representarem desafios topográficos naturais, que afetam a viabilidade de construção, manutenção e operação, e por apresentarem riscos de efeitos transitórios, bolhas de ar dentro da tubulação e movimentos de terra.
- **Proximidade às rodovias:** a proximidade da adutora com rodovias e estradas vicinais facilita a sua implantação, operação e manutenção, o que acarreta em redução de custos logísticos, além de minimizar a perturbação de novas áreas.
- **Proximidade aos cursos d'água:** áreas próximas aos cursos d'água apresentam lençol freático elevado e estão sujeitas a inundação, assim como representam um espaço ambientalmente sensível e passível de contaminação por meio de vazamentos.
- **Uso e cobertura da terra:** aproximar a adutora de centros urbanos oferece a possibilidade de utilizar estruturas existentes, como estradas e infraestrutura de serviços públicos, além de facilitar o direito de passagem, uma vez que a expropriação de terras particulares pode representar um obstáculo à implantação do sistema adutor.
- **Natureza dos solos:** os diferentes tipos de solo influenciam sobre a implantação de adutoras por impactarem o traçado em relação à capacidade de suporte, permeabilidade, esforço de escavação, risco de infiltração e vazamentos, movimento de solos, potencial de erosão, corrosão dos dutos e de contaminação do sistema de distribuição de água. Prioriza-se latossolos, por serem mais espessos e sem rochosidade, e em seguida os solos espessos, mas que podem apresentar rochosidade, como Argissolos e Nitossolos. Logo depois, são preferidos os Cambissolos e Planossolos, por suas características específicas e por fim, Neossolos, solos hidromórficos (Gleissolos, Organossolos e

Espodossolos) por ocorrerem em áreas protegidas e apresentarem limitações geotécnicas, assim como afloramentos rochosos.

Uma vez que os critérios de decisão foram definidos e os respectivos dados coletados e tratados, faz-se necessário o tratamento dos Planos de Informação, no sentido de garantir a compatibilidade entre as informações para que o modelo seja efetivo.

3.4.2 Padronização dos Planos de Informação

A operação entre os PI requer a padronização dos dados de entrada de forma que estejam compatíveis. Os critérios de decisão possuem diferentes atributos de acordo com sua natureza.

Os atributos de foram divididos em 4 graus de favorabilidade (Tabela 11), sendo o grau 1 o que representa maior aptidão em relação ao traçado da adutora, ou seja, menor custo, e o grau 4 representa menor aptidão para a implantação da tubulação, ou seja, maior custo. Cada grau compreende um intervalo ou classe, intrínseco aos critérios, e foi determinado de maneira a representar melhor compreensão visual das áreas de estudo em termos de custo. Wang *et al.* (2022) estrutura seu problema de forma análoga, porém opta por cinco graus de diferenciação.

Os intervalos escolhidos seguiram como modelo faixas de servidão de rodovias e linhas de transmissão e a classificação de declividade da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Enquanto o agrupamento dos atributos de uso e cobertura da terra e solos foi definido de acordo com suas particularidades em relação a implantação do caminhamento do sistema adutor. Os critérios de proximidade às rodovias e aos cursos d'água foram determinadas por meio de *buffers* espaçados em diferentes intervalos e os critérios de uso e cobertura da terra e de solos foram reclassificados a partir de suas feições delimitadas.

Após a reclassificação dos critérios, todas as camadas apresentavam pixels que variam entre 1 e 4 conforme as Figuras 13 e 14.

Tabela 11 – Grau de Favorabilidade dos Critérios de Avaliação.

Classe						Grau de Favorabilidade
Altimetria (m)	Declividade (%)	Proximidade às rodovias (m)	Proximidade aos cursos d'água (m)	Uso e Cobertura da Terra	Solos	
0 - 25	0 - 2	0 - 30	≥ 400	Área Urbanizada, Outras Áreas não Vegetadas, Mineração	Latossolos	1
25 - 75	2 - 6	30 - 60	300 - 400	Pastagem, Mosaico de Usos	Argissolos e Nitossolos	2
75 -150	6 - 10	60 - 100	200 - 300	Formação Florestal, Restinga Arbórea, Silvicultura	Cambissolos e Planossolos	3
≥ 100	≥ 10	≥ 100	0 - 200	Mangue; Campo Alagado e Área Pantanosa; Afloramento Rochoso; Rio, Lago e Oceano	Neossolo, Gleissolos, Organossolos, Espodossolos e Afloramento de Rochas	4

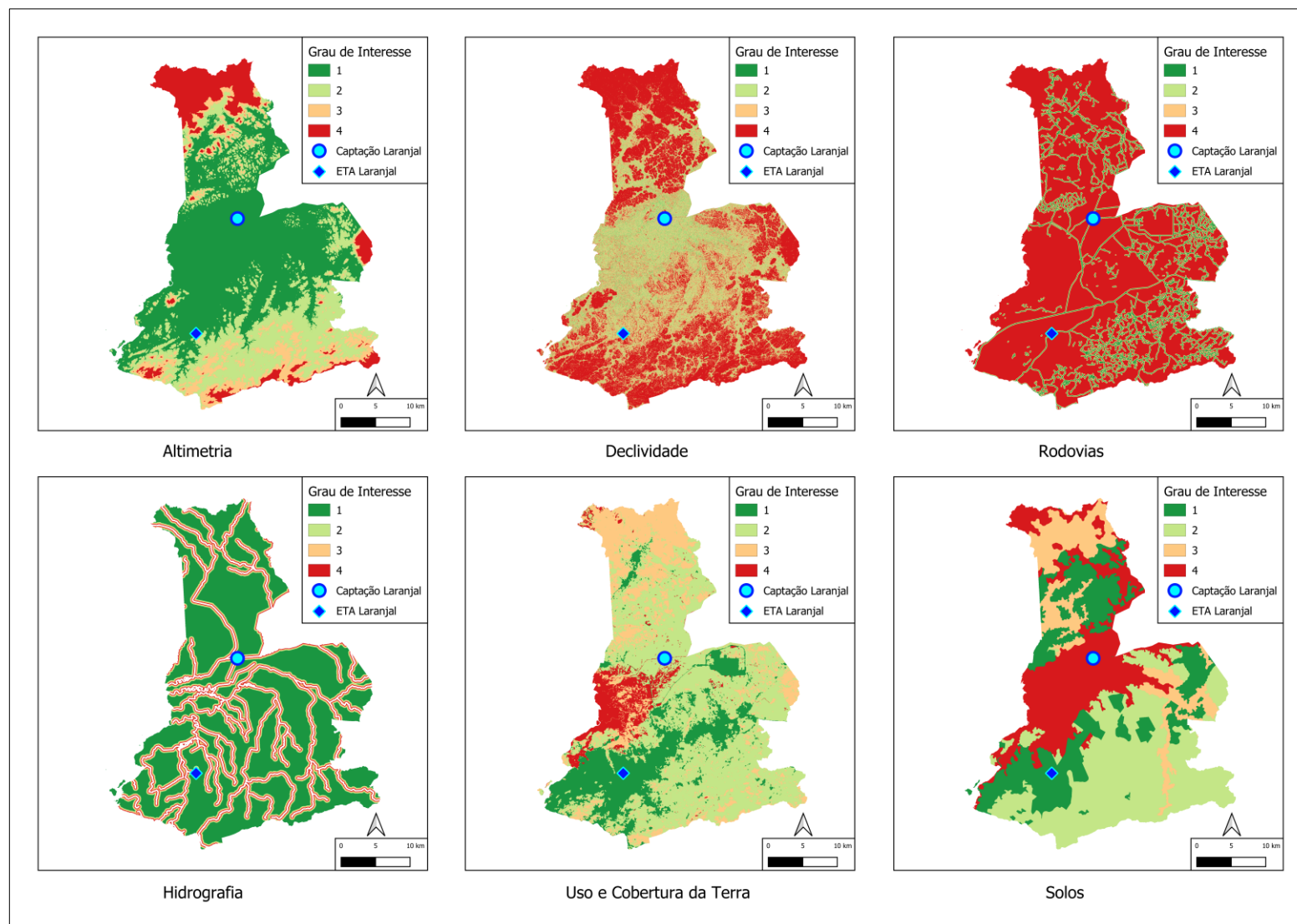


Figura 13 – Planos de Informação – Área de Estudo I.

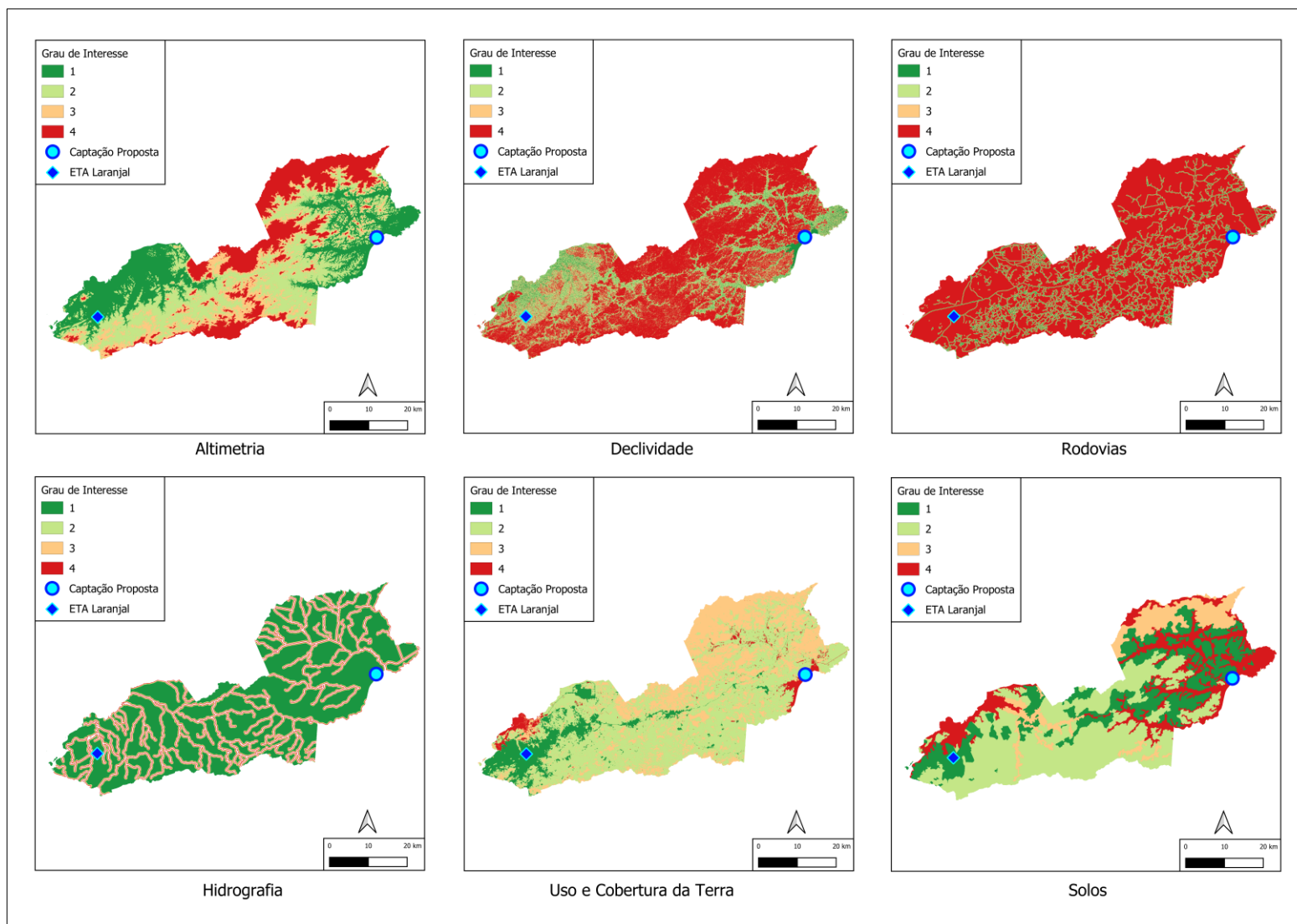


Figura 14 – Planos de Informação – Área de Estudo II

3.4.3 Consulta a especialistas

Para compreender as relações de prioridades entre os critérios definidos, buscou-se consultar especialistas de diferentes áreas. As consultas foram realizadas por meio de entrevistas *online*, sendo apresentada a problemática do trabalho e os critérios de decisão envolvidos. Ao fim da apresentação, os entrevistados deveriam se posicionar em concordância ou não dos critérios selecionados e, caso houvesse, apresentar sugestões de outros critérios que deveriam ser inclusos na análise.

Em seguida, os entrevistados foram questionados acerca da importância relativa entre cada um dos critérios, assim preenchendo a matriz de comparação par-a-par (Tabela 12), utilizando-se dos parâmetros estabelecidos pela Escala Fundamental de Saaty. Por fim, foi possível observar quais aspectos cada um dos profissionais enxergava como prioridade ou não para um projeto dessa dimensão.

Tabela 12 – Modelo da Matriz de Comparação.

Matriz Absoluta	Altimetria (m)	Declividade (%)	Proximidade às rodovias (m)	Proximidade aos cursos d'água (m)	Uso e Ocupação do Solo	Solos
Altimetria (m)	1					
Declividade (%)		1				
Proximidade às rodovias (m)			1			
Proximidade aos cursos d'água (m)				1		
Uso e Ocupação do Solo					1	
Solos						1

3.4.4 Ponderação dos Planos de Informação

A ponderação dos critérios de decisão foi embasada nas respostas coletadas por meio de consultas a especialistas e fundamentada na literatura e contou com a aplicação dos métodos de pesos iguais, AHP e Pesos Inversos com o objetivo de avaliar a sensibilidade do modelo a diferentes conjuntos de pesos atribuídos aos critérios. Foi utilizada a estratégia de acoplamento

frouxo, ou seja, o processo de ponderação se deu em uma plataforma distinta do SIG, no caso em planilha eletrônica.

Os métodos de Pesos Iguais e Pesos Inversos foram aplicados por suas fórmulas diretas, enquanto a AHP seguiu com a construção e preenchimento da matriz de comparação par-a-par, utilizando a Escala Fundamental de Saaty. Cada critério foi comparado a todos os outros, atribuindo-se valores que variam de 1 (importância igual) a 9 (predominância extrema de um critério sobre outro). Após o preenchimento, os pesos relativos foram calculados por normalização da matriz e obtenção do vetor de prioridades. A consistência dos julgamentos foi avaliada por meio da Razão de Consistência (RC), assim garantindo que os valores estivessem abaixo do limite aceitável de 10%, conforme orientado por Saaty (1991).

Como as duas áreas de estudo são muito próximas, em algumas regiões até se sobrepõe, adotou-se os mesmos conjuntos dos pesos ponderados. As ponderações foram calculadas e avaliadas, sendo respeitada a razão de consistência de 10%.

3.4.5 Sobreposição ponderada

Essa etapa consiste no cruzamento dos Planos de Informação para produzir a imagem matricial referente à superfície de custo, camada que indica as áreas mais ou menos favoráveis ao traçado da adutora. A Equação 5 aplicada na operação considera os pesos atribuídos após a aplicação dos métodos ponderativos.

$$\text{Superfície de Custo} = (P_1 * \text{Altimetria} + P_2 * \text{Rodovias} + P_3 * \text{Declividade} + P_4 * \text{Hidrografia} + P_5 * \text{Uso e Cobertura da Terra} + P_6 * \text{Solos})$$

Equação 5 - Fórmula para Cálculo da Superfície de Custo (Calculadora *Raster*)

Em que:

$P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ = peso das variáveis;

Altimetria, Rodovias, Declividade, Hidrografia, Uso e Cobertura da Terra, Solos = variáveis de decisão.

Ao fim do processamento gera-se uma camada *raster* cujo pixels variam entre os valores de 1 a 4, que indicam os graus de favorabilidade à implantação do traçado da adutora,

assim como foi a definido anteriormente para os critérios de decisão, e referem-se da seguinte maneira:

- 1 – Área favorável;
- 2 – Área pouco favorável;
- 3 – Área desfavorável;
- 4 – Área muito desfavorável.

3.4.6 Rota de menor custo

A aplicação do algoritmo de busca geométrica visa determinar os trajetos de menor custo entre os pontos inicial (captação no Canal de Imunana/captação na Lagoa Juturnaíba) e final (ETA Laranjal) definidos para cada área de estudo. Para isso, emprega-se o algoritmo de Dijkstra, cuja escolha se justifica por sua robustez, ampla validação e consolidação na literatura acadêmica, além da facilidade de implementação por meio da função *Least Cost Path* do QGIS.

O algoritmo opera sobre uma representação espacial em forma de grafo, na qual cada nó corresponde a um pixel da superfície de custo, e as arestas representam os custos de transição entre pixels adjacentes. Assim, a eficiência da análise depende diretamente da qualidade da superfície de custo e os dados de entrada que a compõe. Sua aplicação depende da configuração dos pontos inicial e final e definição da superfície de custo.

3.4.7 Avaliação dos caminhamentos

Para quantificar a similaridade entre os traçados calculados e a adutora existente, será utilizada a Distância de Hausdorff, um índice de similaridade espacial. Matematicamente, essa métrica representa o maior desvio necessário para que qualquer ponto de um conjunto alcance o ponto mais próximo do outro conjunto. Em suma, corresponde à maior das menores distâncias entre os dois conjuntos, identificando o ponto de maior afastamento relativo entre eles. Embora semelhante à distância euclidiana, a Distância de Hausdorff diferencia-se por ser capaz de medir a distância entre objetos geométricos complexos, como conjuntos de pontos, excetuando-se objetos pontuais (Min; Zhilin; Xiaoyong, 2007).

A Distância de Hausdorff expressa numericamente a semelhança entre duas geometrias, onde valores menores indicam maior similaridade. Sua aplicação é realizada por meio da tabela

de atributos dos trajetos gerados pelo algoritmo de Dijkstra, utilizando a Adutora Laranjal como camada de referência, no QGIS. A métrica pode ser calculada conforme apresentado na Equação 6:

$$\text{hausdorff_distance}(\$geometry, \text{geometry}(\text{get_feature}('CAMADA_REFERENCIA', 'id', 1)), 0.5) \quad \text{Equação 6 - Aplicação da Distância de Hausdorff}$$

Para análise da favorabilidade dos traçados, foram extraídos os valores de pixel ao longo dos caminhamentos pelo algoritmo de Dijkstra, com base em suas respectivas superfícies de custo. Foi utilizado o plugin *Profile Tool* no QGIS 3.28, configurado para realizar a leitura dos pixels em pontos equidistantes ao longo dos trajetos e assim gerar os perfis de favorabilidade de cada traçado.

A partir desses conjuntos de valores, foram calculadas medidas estatísticas como média, mediana e desvio padrão com o intuito de sintetizar o comportamento dos dados extraídos e facilitar a comparação entre os diferentes traçados. A média fornece uma estimativa do nível geral de favorabilidade do trajeto, enquanto a mediana indica a tendência central, menos influenciada por valores extremos. Já o desvio padrão representa a dispersão dos valores ao longo da rota, permitindo avaliar a homogeneidade ou variabilidade do caminho em relação às zonas mais ou menos favoráveis.

Além desses parâmetros, também foi avaliado a extensão dos traçados, tendo em vista que o comprimento da tubulação implica diretamente em custos com materiais, equipamentos e implementação do sistema.

4 RESULTADOS

4.1 Ponderações

O processo de consulta a especialistas contou com 8 respondentes de um total de 25 solicitações de entrevista. Foram entrevistados oito especialistas, sendo dois engenheiros ambientais, um engenheiro civil, um engenheiro florestal, dois arquitetos, um biólogo e um geólogo. As consultas indicaram uma concordância unânime em relação aos critérios selecionados.

Contudo, foram destacados novos aspectos relevantes para a análise, como a interferência do sistema adutor proposto em relação a outras infraestruturas existentes, como sistemas de drenagem, esgoto, redes elétricas e telefônicas. Também foram sugeridos critérios adicionais, incluindo a disponibilidade de mão de obra, o acesso a materiais para a implantação e manutenção da obra, a elaboração de planos de contingência e de processos de desapropriação, assim como uma avaliação econômica de implantação e de operação do sistema proposto.

Ao avaliar as respostas da matriz de comparação, foi possível observar pontos os quais os julgamentos dos especialistas convergiam ou divergiam. Majoritariamente, os critérios de altimetria, declividade e proximidade às rodovias foram priorizados, por vezes alternando sua ordem.

Em relação às respostas dos especialistas, cinco das oito entrevistas geraram matrizes de comparação que apresentam uma razão de consistência acima de 10%, o que apresenta uma incongruência das respostas. Ainda assim, foi possível extrair das entrevistas a predileção dos especialistas e do grau de relevância de cada critério sobre outro

O processo de ponderação por Pesos Iguais teve sua aplicação direta, enquanto o método AHP e Pesos Inversos consideraram as respostas obtidas nas entrevistas e no material bibliográfico levantado. As ponderações aplicadas na matriz de comparação par-a-par (Tabela 13) geraram uma RC de 9,97%, dentro do limite aceitável. A organização dos critérios em uma ordem de prioridade orientou a determinação dos valores pelo método Pesos Inversos.

Tabela 13 – Matriz de Comparação Par-a-Par não Normalizada.

Matriz Absoluta	Altimetria (m)	Declividade (%)	Proximidade às rodovias (m)	Proximidade aos cursos d'água (m)	Uso e Cobertura da Terra	Solos
Altimetria (m)	1	2	3	8	4	8
Declividade (%)	1/2	1	2	7	5	7
Proximidade às rodovias (m)	1/3	1/2	1	6	5	5
Proximidade aos cursos d'água (m)	1/8	1/7	1/6	1	1/5	3
Uso e Ocupação do Solo	1/4	1/5	1/5	5	1	5
Solos	1/8	1/7	1/5	1/3	1/5	1

Assim foi possível determinar os pesos relativos de cada critério para cada uma das abordagens (Tabela 14). As camadas *raster* foram combinadas por meio de álgebra de mapas, resultando em superfícies de custo para cada método (Figura 15).

E ambas as áreas de estudo, observa-se que as superfícies de custo geradas pelo primeiro método apresentam uma distribuição mais homogênea ao longo de sua extensão, com menores variações de pixels quando comparadas aos resultados referentes à demais abordagens, as quais apresentam uma variação mais acentuada com áreas mais bem definidas em termos de favorabilidade.

Tabela 14 - Pesos dos Critérios.

	1 - Pesos Iguais	2 – AHP	3 –Pesos Inversos
Altimetria (m)	0,167	0,37	0,41
Declividade (%)	0,167	0,27	0,20
Proximidade às rodovias (m)	0,167	0,19	0,14
Proximidade aos cursos d'água (m)	0,167	0,04	0,10
Uso e cobertura da terra	0,167	0,10	0,08
Solos	0,167	0,03	0,07

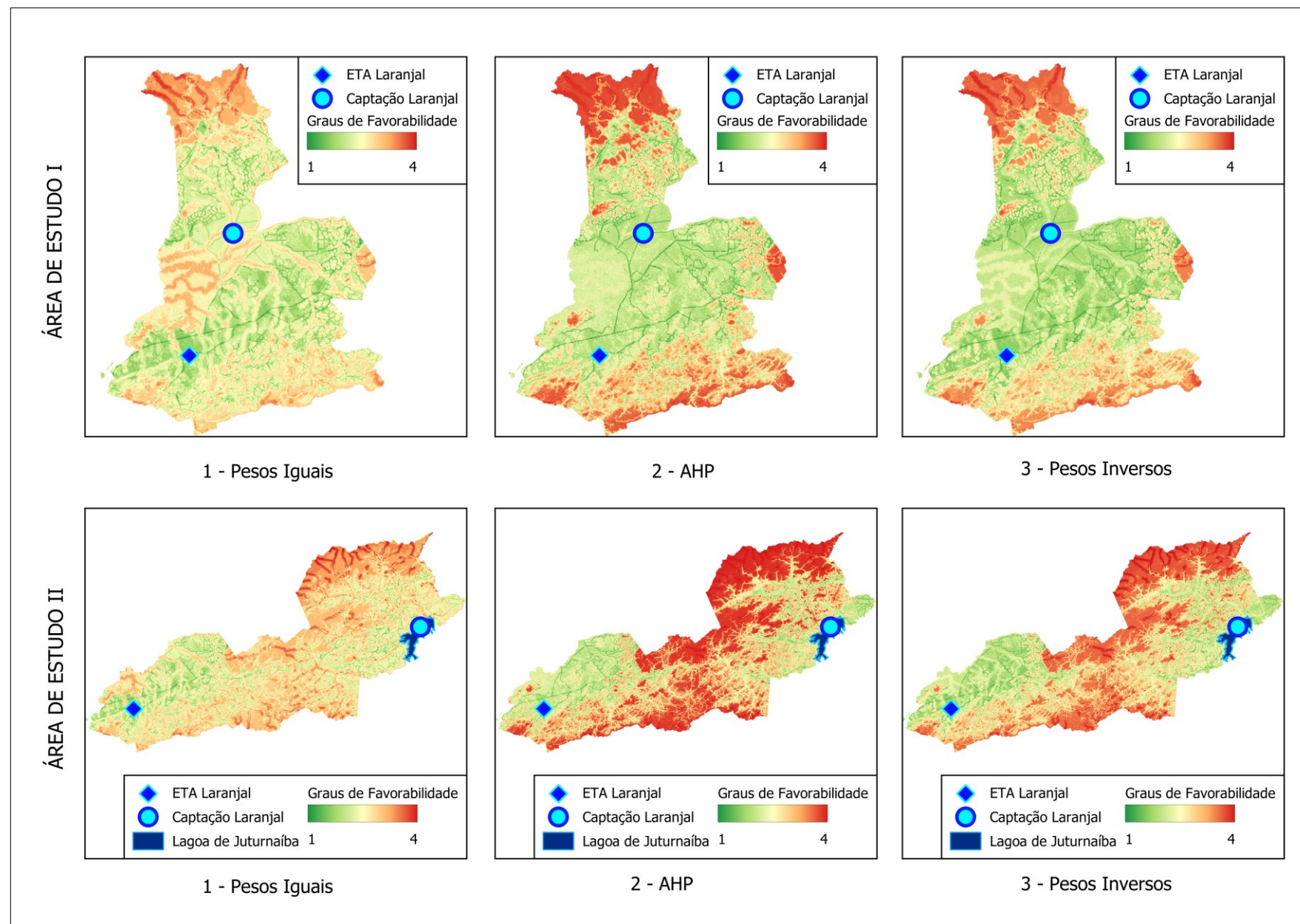


Figura 15 – Superfícies de Custos – Áreas de Estudo I e II.

4.2 Traçados

Os traçados gerados pela aplicação do algoritmo de busca geométrica de Dijkstra são apresentados nas Figuras 16 e 17 para as Áreas de Estudo I e II respectivamente. Os caminhamentos apresentam grande proximidade e, em alguns trechos, até se sobrepõe. No entanto, é possível observar também algumas zonas críticas ao longo dos traçados, onde há maior discrepância entre os caminhamentos.

As inconstâncias identificadas nesses trechos sugerem a influência direta de características pontuais como critérios de maior relevância ou de maior variação espacial. Essas nuances apontam a importância de fatores locais na definição do traçado final, mesmo em análises regionais. Para melhor visualização e compreensão do comportamento dos traçados nessas zonas críticas, são apresentadas as Figuras 18 a 20. A Área de Estudo I apresenta resultados uniformes de forma geral. A única zona crítica está localizada em São Gonçalo, onde ocorre uma divergência significativa entre os caminhamentos, sobretudo a Rota 2, que registra um traçado muito discrepante dos demais, inclusive do traçado de referência.

A Área de Estudo II, por sua vez, apresenta duas zonas críticas, estas mais expressivas do que a vista na Área de Estudo I, e estão localizadas em Silva Jardim e Rio Bonito. A zona crítica identificada em Silva Jardim apresenta uma característica peculiar, onde cada rota toma um caminho completamente diferente, sem apresentar uma tendência geral. Logo em seguida desse desvio, ocorre uma convergência das rotas, para então apresentar mais uma forquedura. Dessa vez, a Rota 1 é a que apresenta um desencontro das demais, que seguem alinhadas.

A zona crítica identificada em Rio Bonito apresenta um teor como o observado no último desvio citado, onde novamente a Rota 1 é a que se distancia da tendência das demais rotas e de forma mais acentuada e prolongada.

As três zonas críticas observadas ocorrem em áreas de maior urbanização, o que sugere que a complexidade espacial e a multiplicidade de fatores presentes nesses locais ampliam as possibilidades de divergência entre os traçados. Áreas urbanas geralmente apresentam dados labirínticos e irresolutos, intrínseco à coexistência de diversos tipos de uso do solo. Portanto, as discrepâncias entre as rotas refletem não apenas as limitações dos dados de entrada, mas também a necessidade de decisões mais refinadas e calibradas ao lidar com ambientes urbanos.

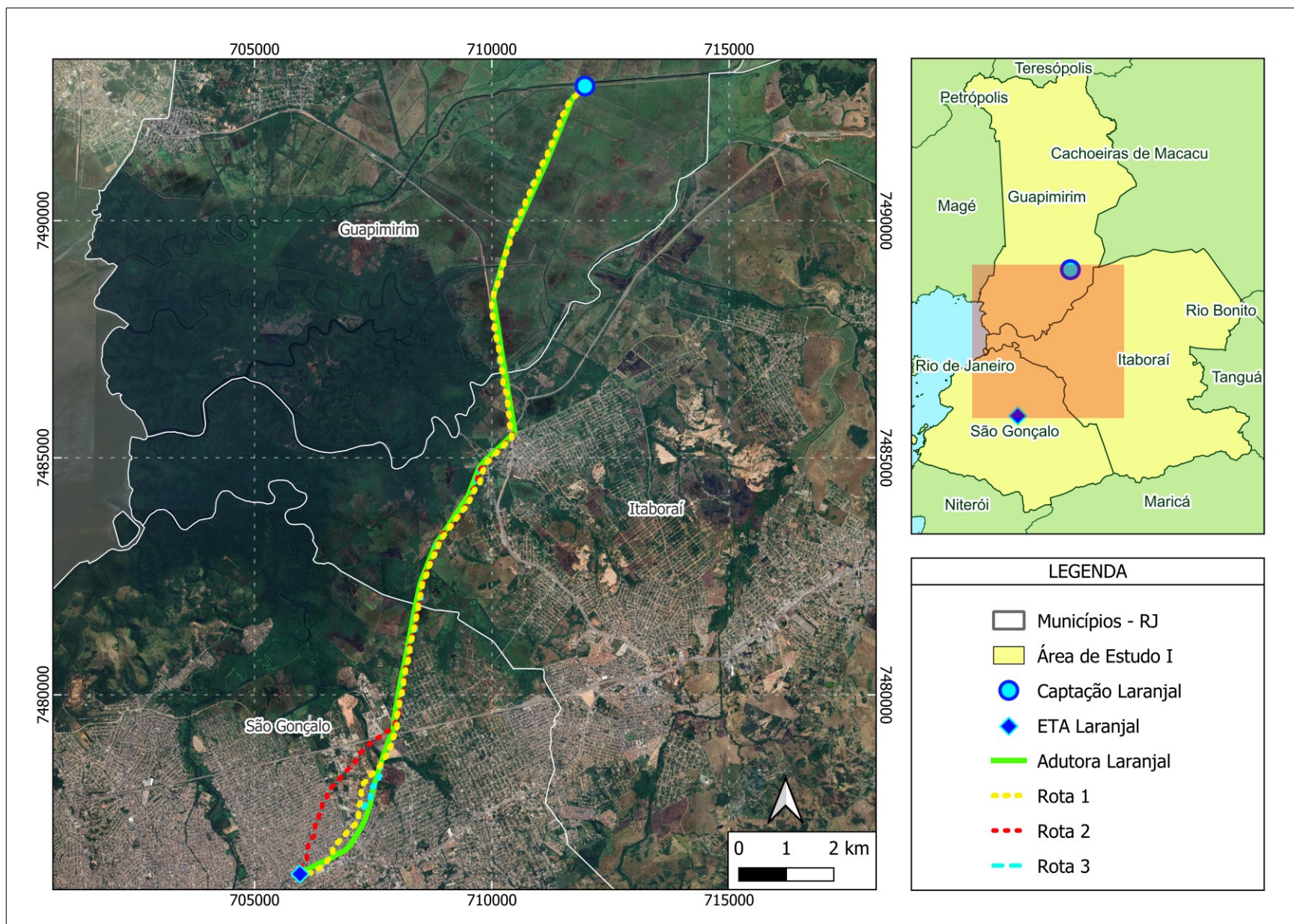


Figura 16 – Rotas Calculadas pelo Algoritmo de Dijkstra – Área de Estudo I.

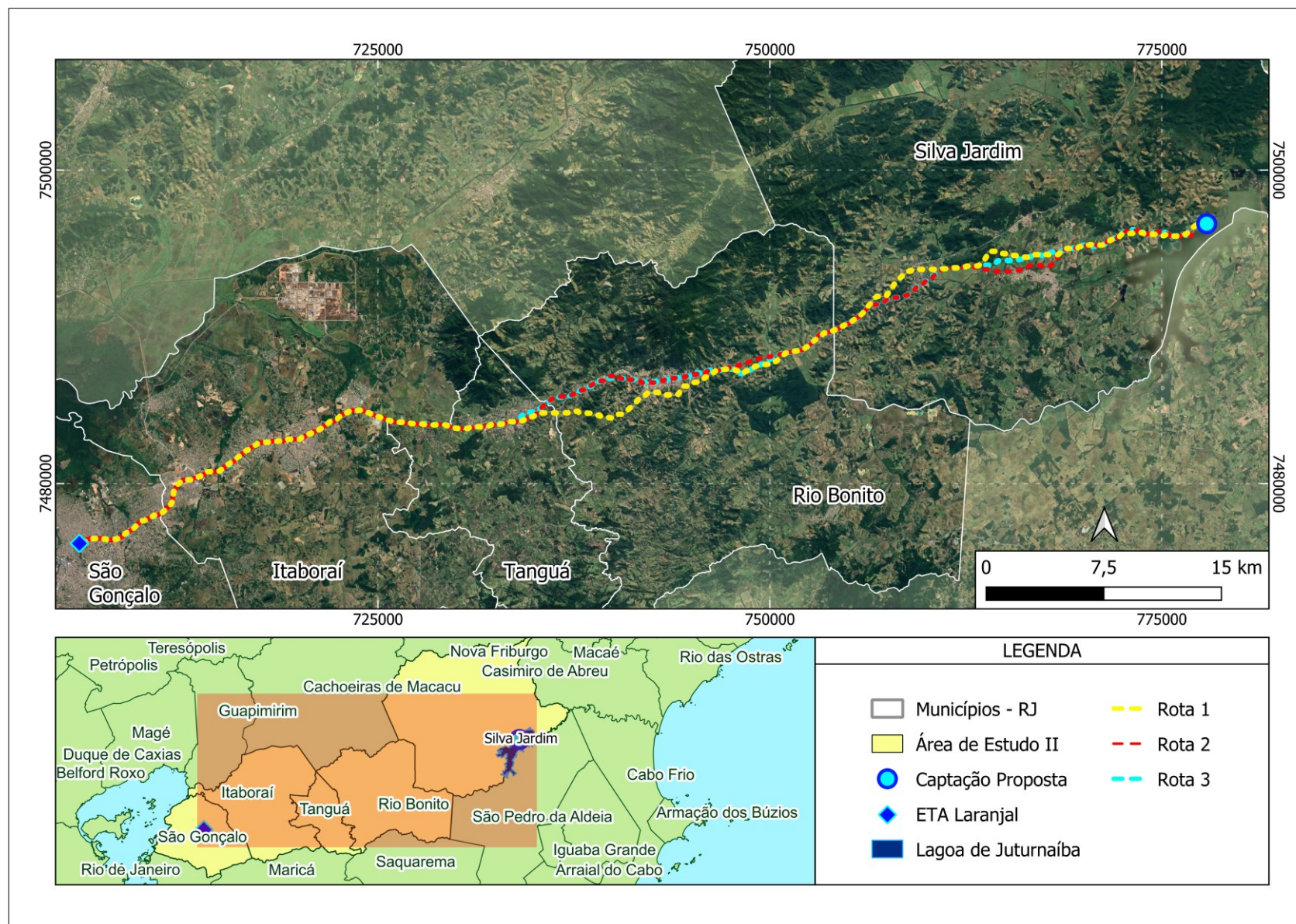


Figura 17 – Rotas Calculadas pelo Algoritmo de Dijkstra – Área de Estudo II.

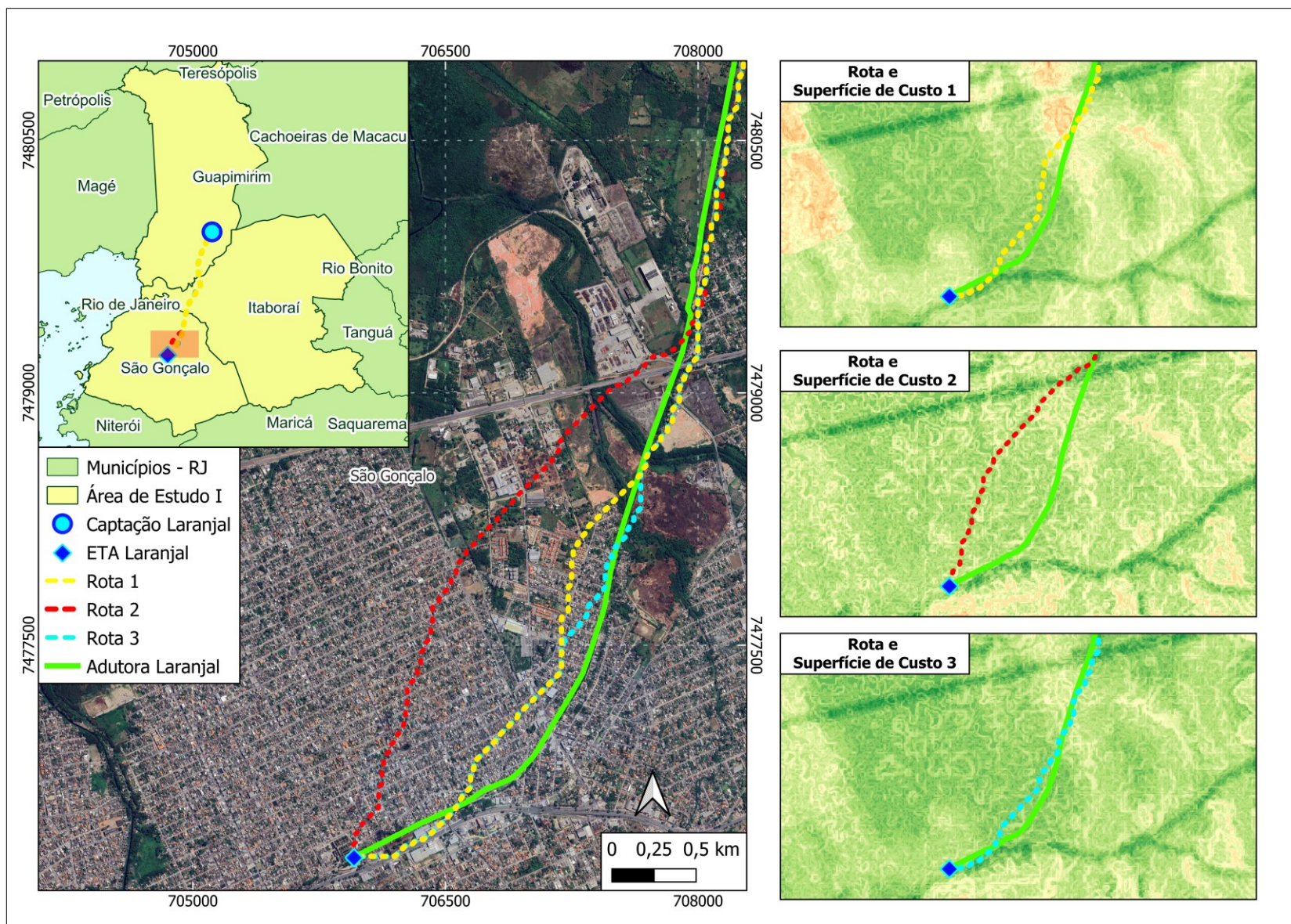


Figura 18 – Zona Crítica de São Gonçalo – Área de Estudo I.

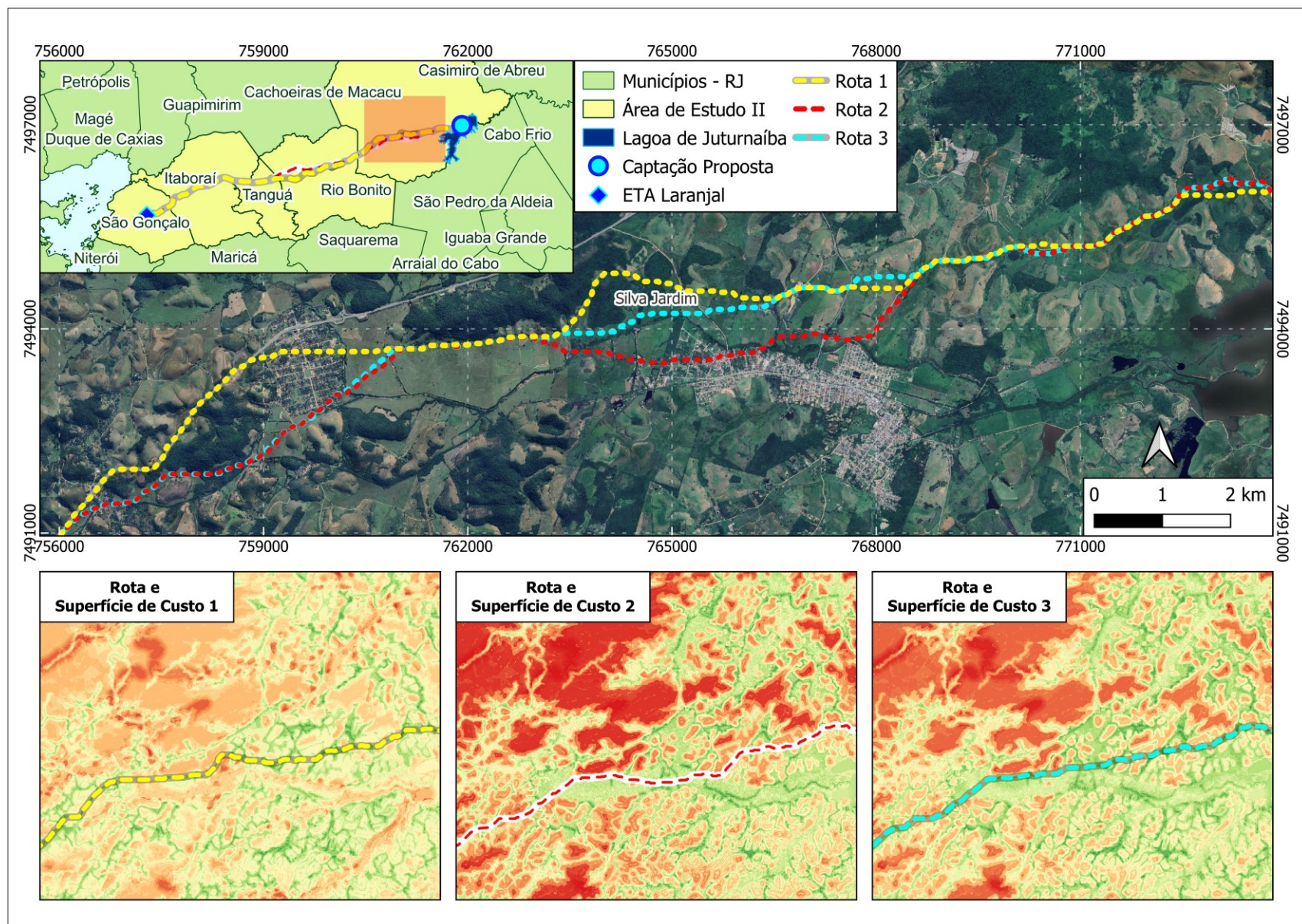


Figura 19 – Zona Crítica de Silva Jardim – Área de Estudo II.

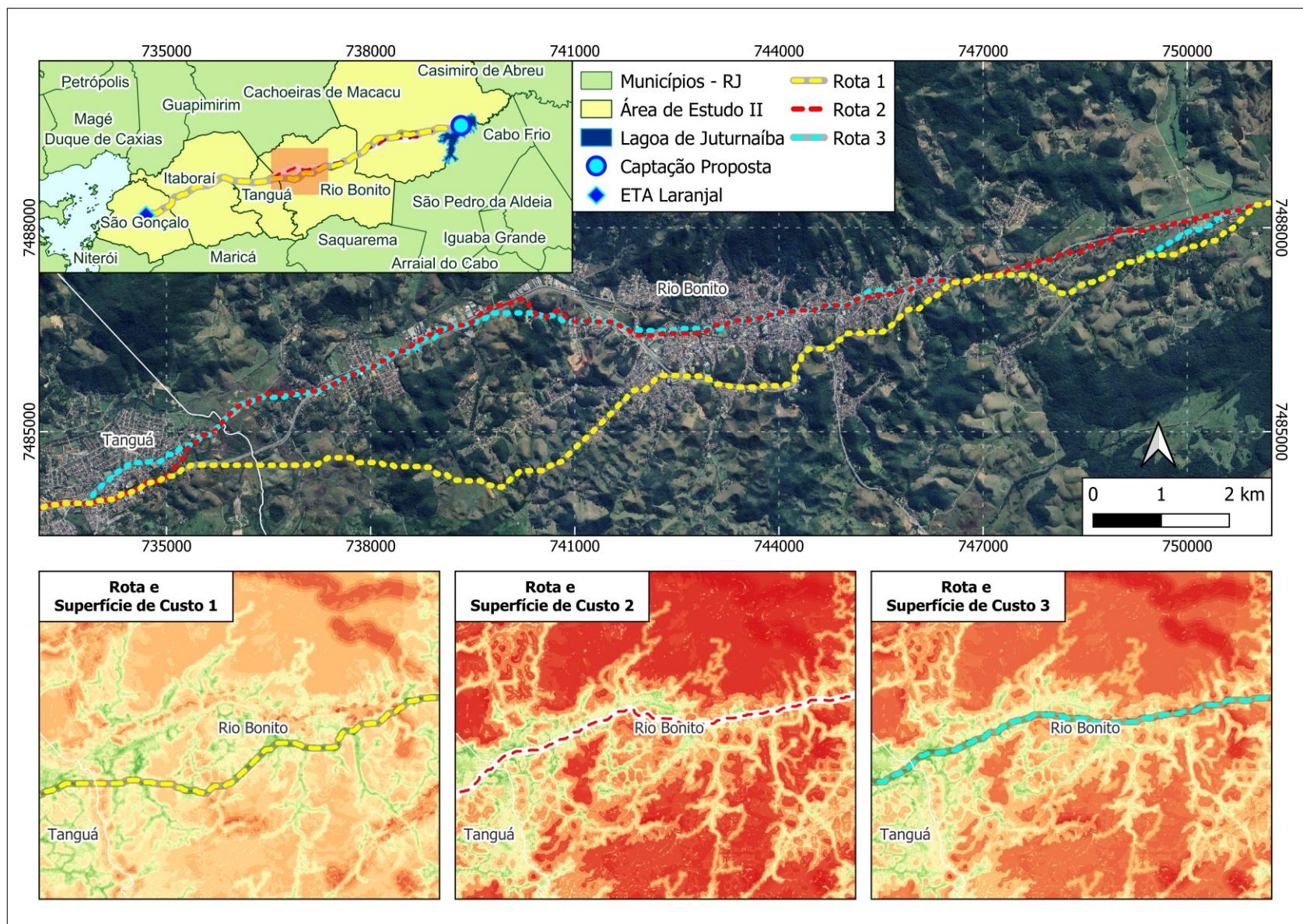


Figura 20 – Zona Crítica de Rio Bonito – Área de Estudo II.

4.3 Parâmetros de avaliação

A Distância de Hausdorff foi adotada como uma métrica de comparação entre rotas, para avaliação do grau de similaridade entre o traçado de referência (Adutora Laranjal) e as alternativas geradas pelo algoritmo de Dijkstra na Área de Estudo I. Outro indicador utilizado foi a extensão total das rotas, dado seu impacto direto sobre o custo de implantação, especialmente em função da quantidade de materiais necessários, como tubulações, conexões e estruturas de suporte. A Tabela 15 apresenta os resultados da avaliação das rotas para ambas as áreas de estudo quanto a Distância de Hausdorff e a extensão dos traçados. As células pintadas em verde apresentam os melhores resultados

Tabela 15 – Avaliação dos Traçados com Destaque em Verde para os Melhores Resultados.

Rota	Área de Estudo I		Área de Estudo II
	Distância de Hausdorff (m)	Extensão (km)	Extensão (km)
1 – Pesos Iguais	243,97	19,63	83,78
2 – AHP	970,19	19,57	84,13
3 – Pesos Inversos	234,72	19,63	83,12

O trajeto com a menor Distância de Hausdorff foi a Rota 3 (234,72 m), seguida pela Rota 1 (243,97 m) e, por fim, a Rota 2 (970,19 m). Esta última apresenta um valor muito além dos calculados para as demais rotas, exibindo uma variação muito grande dos outros trajetos gerados pelo algoritmo, assim como da rota de referência.

Em relação à extensão dos traçados gerados na Área de Estudo I, os resultados estão próximos do comprimento da Adutora Laranjal (18,63 km). A Rota 2 apresenta a menor extensão (19,57 km), 60 metros menor que as Rotas 1 e 3 (ambas com 19,63 km). Já na Área de Estudo II, a Rota 3 apresenta a menor extensão (83,12 km), seguida pela Rota 1 (83,78 km) e por último a Rota 2 (84,13 km).

Os caminhamentos foram analisados por meio do *plugin* Profile Tool do QGIS, sendo gerados pontos equidistantes de 50 m ao longo dos traçados e registrado os valores dos pixels de suas respectivas superfícies de custo. Os dados suavizados por média móvel são apresentados nas Figuras 21 e 22.

Na Área de Estudo I, observa-se uma separação visual mais clara entre os perfis: a Rota 2 se destaca por manter valores consistentemente mais baixos (maior favorabilidade). Em contraste, a Rota 1 apresenta oscilações mais acentuadas e picos de valores mais elevados, o que indica trechos menos favoráveis. Enquanto a Rota 3 exibe comportamento intermediário. Já na Área II, os perfis das três rotas se sobrepõem mais frequentemente, apresentando um cenário mais homogêneo em termos de favorabilidade.

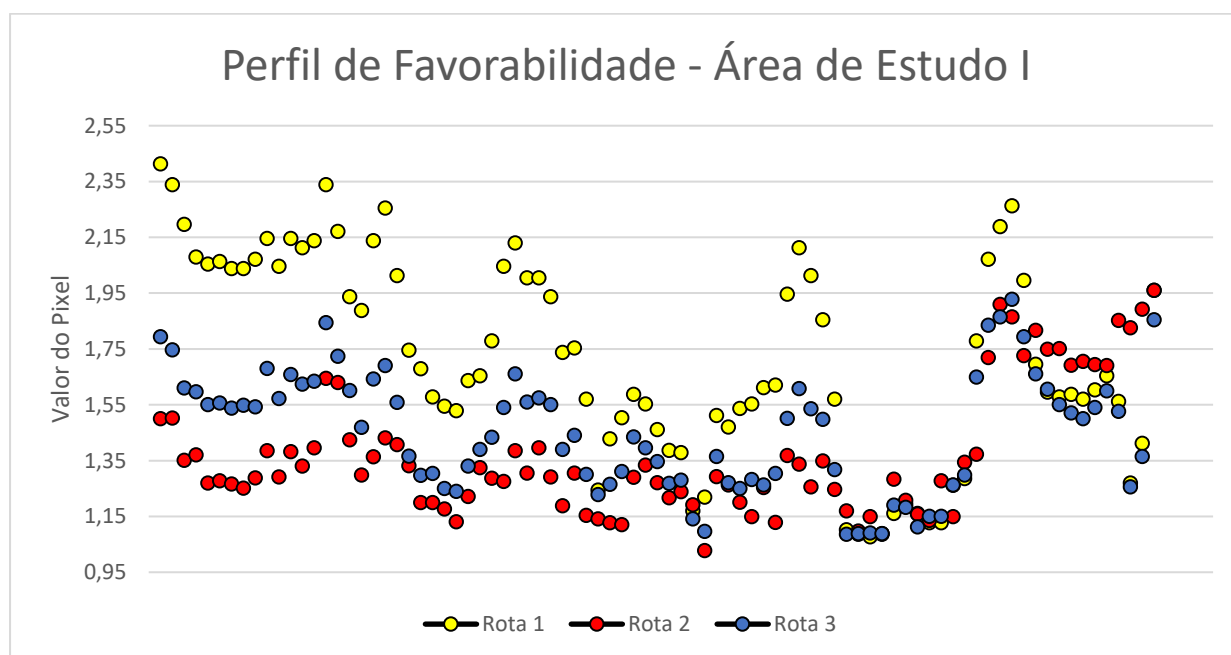


Figura 21 – Perfil de Favorabilidade – Área de Estudo I.

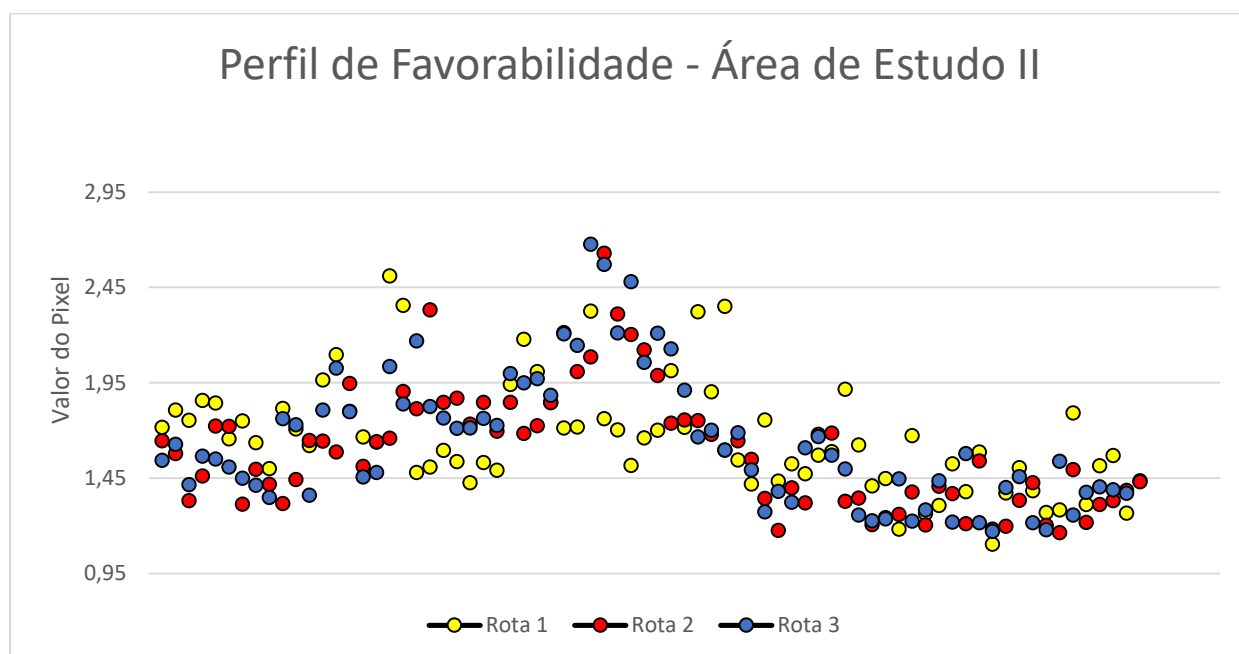


Figura 22 – Perfil de Favorabilidade – Área de Estudo II.

Para complementar a análise, foram consideradas as medidas estatísticas (média, mediana, moda e desvio padrão) dessas amostragens para observar de e comparar o comportamento geral dos traçados. Os resultados são apresentados na Tabela 16 onde as células pintadas em verde apresentam os melhores resultados.

Tabela 16 - Medidas Estatísticas dos Traçados em Relação às suas Superfícies de Custo com Destaque em Verde para os Melhores Resultados.

Parâmetros	Área de Estudo I			Área de Estudo II		
	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3
Média	1,718	1,362	1,452	1,665	1,599	1,646
Mediana	1,670	1,310	1,480	1,670	1,560	1,570
Moda	2,004	1,210	1,510	1,503	1,300	1,490
Desvio Padrão	0,384	0,271	0,246	0,378	0,391	0,415

Na Área de Estudo I, a Rota 2 apresenta os menores valores de média (1,362), mediana (1,310) e moda (1,210) refletindo maior homogeneidade e predominância de valores baixos. A Rota 1 apresenta os maiores valores para todos os parâmetros estatísticos, indicando maior variabilidade e predominância de trechos menos favoráveis. A Rota 3 embora não apresente os melhores resultados, destaca-se por sua estabilidade, refletida na menor dispersão entre os valores.

Na Área de Estudo II, as diferenças entre as rotas são menos marcantes. A Rota 2 apresenta os melhores resultados quanto média (1,599), mediana (1,560) e moda (1,300), e apresenta um baixo valor de dispersão também (0,391), o que reflete uma consistência entre as amostragens. A Rota 1 por sua vez, apresenta os maiores, com exceção do valor de dispersão (0,378), porém esse resultado reforça a persistência das amostras em um grau de favorabilidade mais elevado. A Rota 3 apresenta valores intermediários para média, mediana e moda, no entanto o resultado de dispersão é maior.

5 DISCUSSÃO

Durante o processo de consulta aos especialistas pôde-se notar que, por mais que os entrevistados tivessem conhecimento em sua área específica, diante critérios que não dominavam propriamente, os consultados tendiam a apresentar respostas subjetivas, que por vezes resultou na extrapolação do limite de 10% da razão de consistência na matriz de comparação individual. Macharia, Wathuo e Mundia (2015), ao realizarem um processo de consulta com 50 profissionais de diferente áreas em um estudo em relação aos critérios de análise que influenciam a rota de um oleoduto, constataram o mesmo comportamento.

Observa-se que os resultados gerados pela abordagem de Pesos Iguais (Rota 1), em ambas as áreas de estudo, não se sobressaem no que tange os indicadores analisados. A Área de Estudo I apresenta resultados conflitantes, ao passo que a Rota 2 apresenta a menor extensão, ao mesmo tempo que indica um alto valor para a Distância de Hausdorff, parâmetro esse que destaca a Rota 3. Ainda assim, os valores estatísticos de favorabilidade dos caminhos em relação às suas respectivas superfícies de custo evidenciam a Rota 2 como melhor traçado. Na Área de Estudo II, a Rota 2 também se sobressai na avaliação dos parâmetros estatístico, no entanto, esta apresenta a maior extensão de traçado, enquanto a Rota 3 se revela como menor caminho.

A Rota 1, gerada pela equivalência entre os critérios, representa um ponto de partida neutro e tende a gerar traçados medianos, portanto, não se destaca como o melhor em nenhum parâmetro específico. Ainda que apresente extensão intermediária e bons resultados em dispersão na Área de Estudo II, não alcança o desempenho ótimo em nenhum indicador. A falta de hierarquia de prioridade entre os critérios dilui as influências que poderiam destacar caminhos mais relacionados com o objetivo do projeto.

A Rota 2, por sua vez, é gerada pela abordagem AHP com base em uma análise mais refinada de prioridades e pesos estabelecidos a partir da consulta a especialistas e à literatura. É considerado uma percepção técnica minuciosa, que permite um maior alinhamento dos traçados com os fatores determinantes. Por isso, na Área de Estudo I, a Rota 2 se sobressai em termos de média, mediana e moda de favorabilidade, refletindo caminhos mais homogêneos e consistentes. No entanto, o alto valor da Distância de Hausdorff mostra que, apesar da consistência interna, há um afastamento maior em relação ao traçado de referência, sugerindo

que as ponderações podem ter priorizado fatores que desviam do caminho histórico já consolidado pela adutora existente. Justifica-se também o maior comprimento da Rota 2 na Área de Estudo II, pois a priorização dos fatores pode ter conduzido a escolhas de trajeto que evitam áreas sensíveis, mas alongam o caminho final.

Por último, a Rota 3 representa a abordagem de Pesos Inversos, que, embora também derivada de uma hierarquia de prioridades obtida a partir de consultas a especialistas e à literatura, adota uma formulação mais direta e menos detalhada do que a AHP. Essa simplificação faz com que, na prática, a Rota 3 apresente resultados mais aproximados aos da Rota 2, mas com diferenças pontuais. A abordagem é capaz de oferecer traçados embasados, mesmo quando as diferenças entre os pesos dos critérios não são tão significativas quanto as obtidas em uma matriz de comparação detalhada.

Assim, entende-se que a Rota 2 é o caminhamento que contempla as importâncias relativas dos critérios de forma mais criteriosa e por isso gera resultados com melhores performances, destacando-se em relação aos outros traçados. O grande desvio da Rota 2 na zona crítica de São Gonçalo pode ser entendido por uma falta de classificação da informação de uso e cobertura da terra, pois o dado classifica a região apenas como “área urbana”, sem destacar as minuciosidades presentes na mancha urbana, que são essenciais para a determinação do traçado com maior assertividade e coerência em relação ao meio urbano.

Nonis; Varghese; Suresh (2007) argumentam que apesar da metodologia apresentar uma orientação bem estruturada para o traçado da adutora, há diversas verdades de campo que devem ser levadas em consideração ao definir o caminhamento final, que deve ser subsidiado por uma análise mais ampla, incorporando aspectos quantitativos e técnicos a nível de projeto executivo.

Assim, a Rota 2, apesar de ser um traçado otimizado, não pode ser classificada como a rota “ótima” de maneira definitiva. O modelo desenvolvido atua em nível conceitual, e os resultados devem ser encarados como propostas iniciais de planejamento. A escolha final do traçado demanda a realização de estudos complementares, análises e vistorias de campo que considerem aspectos operacionais, geotécnicos, jurídicos, socioambientais e de segurança específicos da região. Fatores como obstáculos técnicos não mapeados, necessidade de desapropriações, impactos sobre comunidades locais ou áreas de preservação podem alterar as

decisões em fases posteriores do projeto. Portanto, a Rota 2 se apresenta como a melhor alternativa entre as simuladas, mas sua consolidação como trajeto definitivo depende da continuidade dos estudos e do detalhamento do projeto.

A estratégia de utilizar mais de um conjunto de valores para os pesos dos critérios de análise também ocorre nos estudos de Jankowski e Richard (1994), Abudu e Williams (2015) e Nonis, Varghese e Suresh (2007). Os autores comparam os resultados dos traçados gerados a partir de um processo de ponderação e a partir da determinação de pesos iguais. Essa comparação se torna valiosa para identificar zonas críticas e visualizar a tendência geral dos traçados.

Assim como no presente estudo, Jankowski e Richard (1994) identificaram a coexistência da robustez e sensibilidade do modelo multicritério, ao destacar coerências e discrepâncias entre os traçados. Os resultados obtidos pelos autores indicam consistência ao apresentar o mesmo traçado como melhor opção diante a alteração dos pesos das variáveis. Paralelamente, a sensibilidade do modelo a mudanças pontuais nos pesos impactou a classificação final das rotas em zonas críticas, onde há disputa muito próxima entre as alternativas.

Os caminhamentos desenvolvidos no estudo Abudu e Williams (2015) apresentam uma grande variação espacial e não há uma sobreposição ou semelhança ao longo dos traçados. Já Nonis, Varghese e Suresh (2007) obtém resultados mais alinhados em comparação ao estudo anteriormente citado, no entanto ainda apresentam grandes discrepâncias entre as rotas. Apesar disso, os resultados de ambos estudos são capazes de evidenciar uma, ainda que pouco expressiva, tendência entre os traçados.

Ao variar os pesos atribuídos aos critérios de análise, é possível visualizar como essas alterações influenciam a configuração final das rotas geradas. Em determinadas áreas, mesmo pequenos ajustes nos pesos podem provocar mudanças significativas nos caminhos calculados, revelando zonas críticas de alta sensibilidade. Esses locais refletem maiores disputas entre as alternativas devido a contextos territoriais complexos, como áreas urbanas densas, interfaces entre diferentes usos do solo ou regiões com desafios topográficos acentuados. Assim, identificar essas zonas críticas permite aos planejadores direcionar esforços para estudos mais

detalhados, levantamentos de campo ou análises complementares que aumentem a segurança e a confiabilidade da decisão final.

Por outro lado, existem áreas onde os trajetos se mantêm praticamente inalterados, mesmo com variações significativas na ponderação dos critérios. Essa estabilidade dos traçados em diferentes abordagens de priorização sugere uma forte coesão entre os critérios envolvidos e aponta para uma homogeneidade espacial que reduz a incerteza e reforça a robustez do modelo. Nesses locais, a escolha do traçado mais viável tende a ser mais confiável. A partir desse panorama gerado pela junção de zonas críticas e estáveis, é possível compreender os desafios e oportunidades ao longo da extensão do projeto.

Ao incorporar ao modelo os critérios de uso e cobertura da terra e natureza dos solos, busca-se enriquecer o modelo proposto por Amaral, Cirilo e Ribeiro Neto (2020) que argumentam que a aplicação da metodologia e dos critérios selecionados garantem os melhores contextos topográficos em termos de implantação e operação de um sistema adutor de água.

A inclusão de critérios adicionais, como interferências com outras infraestruturas existentes e avaliação econômica detalhada, pode expandir a abrangência e a aplicabilidade do modelo, além de possibilitar melhor compreensão sobre a viabilidade financeira da implantação e manutenção do sistema proposto.

Um ponto a ser considerado em pesquisas futuras, refere-se à integração de processos participativos de consulta pública e de planejamento colaborativo. Abudu e Williams (2015) recomendam que fatores sociopolíticos, socioeconômicos e até religiosos, para os quais os dados muitas vezes não estão disponíveis ou são pouco confiáveis, sejam incorporados.

A participação social pode contribuir para a identificação de novos critérios relevantes que não foram capturados inicialmente no modelo, além de promover maior legitimidade e aceitação das decisões tomadas. Essa integração entre aspectos técnicos e sociais é importante, principalmente em projetos de infraestrutura de grande escala, para garantir resultados mais sustentáveis e que minimizem conflitos futuros.

Diferentemente do estudo de Raj e Bansal (2024), que considera áreas de restrição, como áreas protegidas, redes de serviços e restrições subterrâneas, estas não foram incorporadas ao modelo aplicado no presente trabalho. A classificação dos atributos dos

critérios de análise em termos de favorabilidade procurou evitar áreas sensíveis e críticas ao traçado da adutora. No contexto dessa pesquisa, seria relevante considerar áreas de restrição como unidades de preservação, terras indígenas e quilombolas ou sítios arqueológicos, no entanto as áreas de estudos não envolviam nenhum dos aspectos citados.

Para uma ampliação e maior desdobramento da metodologia, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas que avaliem outros recursos, como a aplicação do algoritmo A* que promete uma eficiência computacional. Sugere-se também a integração de métodos que sejam capazes de avaliar orçamento de obra e custo energético operacional, de forma a simular o impacto de cada traçado não apenas sob ponto de vista geoespacial, mas também econômico e logístico, oferecendo apoio a decisões de investimento.

Por mais que a disponibilidade hídrica do reservatório de Juturnaíba não seja suficiente para suprir sozinha a demanda de água da Região Leste Metropolitana do Rio de Janeiro para 2030, ainda é capaz de proporcionar um reforço no Sistema Imunana-Laranjal.

É importante discutir sobre a saúde do manancial estudado. A transposição de águas entre bacias hidrográficas é uma questão delicada em termos de gestão de recursos hídricos, já que essa alteração implica diretamente em desenvolvimento social e econômico, além de questões ambientais associadas (Noronha; Monteiro, 2013).

A ampliação da captação de água envolve uma série de medidas, ações e cuidados com o corpo hídrico para manter sua integridade quanto a qualidade e quantidade. Noronha e Monteiro (2013) defendem o monitoramento sistemático na bacia, com instalação de estações pluviométricas, fluviométricas, e de qualidade de água para geração de séries mais representativas a fim de se definir com segurança os aportes, a real disponibilidade e a condição da qualidade da água para assegurar os critérios de uso dos recursos hídricos na bacia e garantir o efetivo controle na emissão de outorgas.

6 CONCLUSÃO

A metodologia de integração de técnicas de geoprocessamento, de tomada de decisão e aplicação de algoritmo se apresentou capaz de solucionar problemas de roteamento e gerar resultados viáveis para orientar uma análise exploratória. A relevância deste estudo está no emprego do modelo multicritério espacial para a otimização do traçado de uma adutora de água em uma região que enfrenta episódios de escassez hídrica.

A integração de técnicas de análise multicritério, algoritmos de busca geométrica e SIG permitiu uma abordagem holística e fundamentada para apresentar propostas iniciais de concepção de um sistema de adução de água para o cenário de ampliação do Sistema Integrado Imunana-Laranjal a partir do manancial Lagoa de Juturnaíba, ao incorporar critérios de altimetria, declividade, proximidade a rodovias e cursos d'água, uso e cobertura da terra e tipos de solo.

Apesar da escassez de publicações focadas na aplicação em sistemas adutores, é possível metodologias análogas em outras obras lineares de engenharia, que podem fornecer novas perspectivas ao trabalho, sendo necessário considerar os contextos das áreas de estudo e das peculiaridades do sistema em questão. O desenvolvimento da pesquisa se torna possível graças a disponibilidade dos dados de alta resolução das áreas de estudo, assim como o vasto material de instrução em relação às metodologias aqui aplicadas.

A estruturação do problema, objetivos, condições e aspectos considerados influenciam diretamente nos resultados gerados. Deve-se ter conhecimento da realidade e contexto da área de estudo, assim como garantir a disponibilidade e qualidade dos dados e ferramentas de análise.

O recurso de consultar especialistas afim de embasar o processo de ponderação dos critérios deve ser feito com cautela e planejamento. Essa etapa requereu uma grande demanda de tempo, mas foi importante para a validação dos critérios escolhidos e discutir possíveis lacunas do projeto de concepção. Importante instruir devidamente os consultados para o preenchimento da matriz de comparação de maneira a respeitar a o limite de 10% da razão de consistência.

Os resultados apresentaram uma baixa variabilidade nos traçados gerados, indicando uma forte coerência entre os critérios escolhidos e sua interdependência espacial. Esse comportamento reforça a robustez do modelo para análises em escala regional, mesmo diante de diferentes abordagens de ponderação. A semelhança nos caminhos gerados sugere que os critérios e suas relações estão bem alinhados ao contexto geográfico das áreas de estudo.

Embora o modelo tenha gerado traçados similares, foi possível identificar zonas críticas que merecem maior atenção diante um desenvolvimento do projeto em questão. Isso demonstra que a abordagem não apenas fornece subsídios para o planejamento inicial, mas também aponta direções específicas para detalhamentos futuros.

Ao avaliar os traçados gerados para ambas as áreas de estudo de acordo com os indicadores selecionados como a Distância de Hausdorff, extensão e perfil de favorabilidade dos traçados e os parâmetros estatísticos, observa-se que a Rota 2, gerada pelo processo de ponderação via AHP, gerou os melhores resultados. Isso se deve ao processo estruturado e abrangente que o método envolve.

Ainda assim, a Rota 2 deve passar por um processo de maior análise, com estudos mais aprofundados em relação à qualidade dos dados e conhecimento da área de estudo em visitas de campo para então definir um caminhar ótimo a partir do resultado inicial gerado pela metodologia.

As limitações do estudo devem ser reconhecidas. A qualidade dos resultados depende fortemente da precisão e atualização dos dados espaciais utilizados. Dados desatualizados ou de baixa resolução ou classificação podem comprometer a representatividade do modelo, gerando rotas inadequadas ou imprecisas.

Além disso, mesmo com o uso de métodos estruturados, como o AHP ou Pesos Inversos, a definição dos pesos dos critérios incorpora certo grau de subjetividade, pois reflete percepções e julgamentos de especialistas e da literatura, intrínseco aos métodos de ponderação, que podem não capturar todas as especificidades locais. Os fatores dinâmicos, sociais, jurídicos ou de segurança pública, como conflitos fundiários, oposição de comunidades ou restrições ambientais temporárias, normalmente não são incorporados diretamente no modelo, o que limita a análise a uma perspectiva estática do território.

O algoritmo de Dijkstra, embora consolidado e confiável, busca apenas o menor custo acumulado, sem considerar múltiplos objetivos simultâneos ou possíveis otimizações de desempenho com heurísticas. Seu uso também demanda atenção quanto ao custo computacional em grafos complexos e de grande escala.

O método proposto gera traçados conceituais e preliminares, sendo imprescindível que as rotas sejam validadas por estudos executivos e avaliações em campo, considerando aspectos técnicos adicionais, como a viabilidade hidráulica, a geotecnia e os custos de desapropriação e operação do sistema. O estudo não apenas valida a aplicabilidade de metodologias integradas para problemas espaciais complexos, mas também sugere direções futuras para sua evolução. O modelo proposto oferece uma base para estudos de infraestrutura linear e propicia decisões mais sustentáveis e fundamentadas, especialmente em regiões sujeitas a limitações ambientais e econômicas.

Os resultados obtidos ao longo do trabalho confirmam a hipótese proposta. A integração entre os modelos de decisão multicritério e o algoritmo de Dijkstra demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a identificação de rotas de adutoras tecnicamente viáveis e alinhadas aos critérios da engenharia. O modelo contribuiu para a minimização de riscos operacionais e socioambientais, ao evitar zonas sensíveis e considerar diferentes aspectos territoriais de forma espacializada e ponderada.

Por fim, o trabalho atendeu aos seus objetivos ao definir os critérios de decisão para a otimização do traçado da adutora, considerando aspectos técnicos, geográficos e ambientais alinhados à realidade do projeto. A análise de sensibilidade do modelo, realizada com abordagens de ponderação distintas, demonstrou a robustez do método, mas também ressaltou a presença de zonas críticas que exigem investigações mais aprofundadas. A geração de traçados pelo algoritmo de Dijkstra e a avaliação de seus desempenhos com indicadores espaciais e estatísticos permitiram identificar a favorabilidade das rotas dentro de uma perspectiva de exploratória. Esses resultados validam o modelo proposto, que se apresenta como uma ferramenta inicial de concepção, contribuindo para decisões mais bem fundamentadas e adaptadas às particularidades regionais. Assim, a ampliação do Sistema Integrado Imunana-Laranjal a partir da adução da água do manancial Lagoa de Juturnaíba torna-se um cenário factível.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUDU, Dan; WILLIAMS, Meredith. GIS-based optimal route selection for oil and gas pipelines in Uganda. *Advances in Computer Science*, v. 4, p. 93–104, 31 jul. 2015.

AMARAL, Francisco Eudes do. Uso de técnicas de geoprocessamento na otimização do traçado e na melhoria operacional de sistemas adutores de abastecimento de água. 2019. Tese (Doutorado)—Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29800>. Acesso em: 15 maio 2025.

AMARAL, Francisco Eudes do; CIRILO, José Almir; RIBEIRO NETO, Alfredo. Uso de técnicas de geoprocessamento na otimização do traçado de sistemas adutores de abastecimento de água com a utilização de uma base de dados de alta definição. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, p. 381–391, 17 abr. 2020.

BIDEGAIN, Paulo; PEREIRA, Luiz Firmino Martins. Plano das bacias hidrográficas da Região dos Lagos e do Rio São João. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.

BIOLCHINI, Jorge Calmon de Almeida et al. Scientific research ontology to support systematic review in software engineering. *Advanced Engineering Informatics*, v. 21, n. 2, p. 133–151, abr. 2007.

BOROUSHAKI, Soheil; MALCZEWSKI, Jacek. Using the fuzzy majority approach for GIS-based multicriteria group decision-making. *Computers & Geosciences*, v. 36, n. 3, p. 302–312, 1 mar. 2010.

BRIOZO, Rodrigo Amancio; MUSETTI, Marcel Andreotti. Método multicritério de tomada de decisão: aplicação ao caso da localização espacial de uma Unidade de Pronto Atendimento – UPA 24 h. *Gestão & Produção*, v. 22, p. 805–819, 29 set. 2015.

BRITTO, Ana Lucia; JOHNSON, Rosa Maria Formiga; CARNEIRO, Paulo Roberto Ferreira. Abastecimento público e escassez hidrossocial na metrópole do Rio de Janeiro. [S.l.]: [s.n.], n. 1, 2016.

CORDÃO, M. J. S.; LACERDA, I. S.; NETO, A. Uso de SIG como ferramenta de apoio à decisão espacial para traçado de adutoras. 2012. [S.l.]: [s.n.].

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269–271, dez. 1959.

DONEDA, Danilo; ALMEIDA, Virgílio A. F. O que é a governança de algoritmos. In: CANABARRO, Diego; DONEDA, Danilo; ALMEIDA, Virgílio A. F. (org.). *Tecnopolíticas da vigilância: perspectivas da margem*. São Paulo: Boitempo, 2018.

DORIGO, Marco; BIRATTARI, Mauro; STUTZLE, Thomas. Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, v. 1, n. 4, p. 28–39, nov. 2006.

DUARTE, Armando Dias. Proposição de um algoritmo metaheurístico para o traçado ótimo de adutoras. 2024. Tese (Doutorado)—Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/52056>. Acesso em: 21 ago. 2024.

FREIMAN, Fabiano Peixoto; SANTOS, Daniel Rodrigues dos. Planejamento do traçado de diretrizes de linha de transmissão de energia elétrica baseado em otimização multicritério e SIG. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 71, n. 3, p. 878–905, 25 set. 2019.

GARCIA DE GOUVEIA, Andreza. Abastecimento de água e escassez hidrossocial no município de São Gonçalo, Rio de Janeiro. [S.l.]: [s.n.].

GILLESPIE, Tarleton. The relevance of algorithms. In: GILLESPIE, Tarleton; BOCZKOWSKI, Pablo J.; FOOT, Kirsten A. (org.). *Media technologies: essays on communication, materiality, and society*. Cambridge, MA: MIT Press, 2013. p. 167–194.

GOMES, Luiz; GOMES, Carlos Francisco. *Managerial decision making: multi-criteria approach*. New York: Springer, 2009.

GONZÁLEZ-PAVÓN, César et al. Optimization of collective irrigation network layout through the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) multicriteria analysis method. *Water*, v. 16, n. 3, p. 370, jan. 2024.

GRECO, Salvatore; EHRGOTT, Matthias; FIGUEIRA, José. *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. New York: Springer, 2016.

HERNANDES, Elis et al. Using GQM and TAM to evaluate StArt – a tool that supports systematic review. *CLEI Electronic Journal*, v. 15, n. 1, 1 abr. 2012.

INEA-RJ. Atlas dos mananciais de abastecimento público do Estado do Rio de Janeiro: subsídios ao planejamento e ordenamento territorial. Rio de Janeiro: Ikemoto, Silvia Marie (Coordenação Geral); Napoleão, Patrícia Rosa Martines (Coordenação Executiva), 2018.

JANKOWSKI, P.; RICHARD, L. Integration of GIS-based suitability analysis and multicriteria evaluation in a spatial decision support system for route selection. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 21, n. 3, p. 323–340, 1 jun. 1994.

JANKOWSKI, Piotr. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 9, n. 3, p. 251–273, maio 1995.

KAINZ, Wolfgang. *The mathematics of GIS*. Viena: University of Vienna, ago. 2010.

KATHUO, Peter; MUBEA, Kenneth. Application of GIS technologies in optimal routes modelling of water utilities to spur development. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, v. 5, p. 434–441, 9 fev. 2016.

KITCHENHAM, Barbara. *Procedures for performing systematic reviews*. Keele: Keele University, v. 33, 1 ago. 2004.

LABHID-COPPE/UFRJ; INEA. *Plano Estadual de Recursos Hídricos - RJ: Relatório Síntese*. Rio de Janeiro, maio 2014.

LACERDA, Ivonaldo de Sousa. *Regras de operação para sistemas de abastecimento de água com baixo nível de automação e sujeitos a incertezas*. 2009a. Dissertação (Mestrado)—Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.

LACERDA, Ivonaldo de Sousa. *Regras de operação para sistemas de abastecimento de água com baixo nível de automação e sujeitos a incertezas*. Campina Grande – PB: Universidade Federal de Campina Grande, 23 abr. 2009b.

LAVALLE, Steven M. *Planning algorithms*. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

LIGHT, Jennifer S. When computers were women. *Technology and Culture*, v. 40, n. 3, p. 455–483, 1999.

LOPES, Kenya; COELHO, Márcia; LIBANIO, Marcelo. Aplicação do método da análise hierárquica na priorização da reabilitação de redes de distribuição de água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 4, p. 181–194, 2011.

MACHARIA, Peter; WATHUO, Miriam; MUNDIA, Charles. Experts' responses comparison in a GIS-AHP oil pipeline route optimization: a statistical approach. *American Journal of Geographic Information System*, v. 4, p. 53–63, 24 abr. 2015.

MALCZEWSKI, Jacek. *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: Wiley, 1999.

MALCZEWSKI, Jacek. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 20, n. 7, p. 703–726, ago. 2006.

MIN, D.; ZHILIN, L.; XIAOYONG, C. Extended Hausdorff distance for spatial objects in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 21, p. 459–475, 2007.

MOTIEE, Homayoun et al. A decision making approach for water transfer systems by Analytical Hierarchy Process (AHP) and GIS. *Water Resources Management*, v. 37, n. 12, p. 4623–4637, 1 set. 2023.

NAGEL, Stuart S.; BIEVENUE, Lisa. *Teach yourself decision-aiding software*. Champaign, IL: Decision Aids Inc., 1989.

NEVES, Patrícia Takaki. *Variações e aplicações do algoritmo de Dijkstra*. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação)—Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 10 ago. 2007.

NONIS, Colin Nithin; VARGHESE, Koshy; SURESH, K. S. Investigation of an AHP-based multi-criteria weighting scheme for GIS routing of cross country pipeline projects. [S.l.]: [s.n.], ago. 2007.

NORONHA, Gustavo Carneiro de. *Avaliação hídrica do Lago de Juturnaíba como alternativa de abastecimento de água do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro – COMPERJ*. 2009. Dissertação (Mestrado)—Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ.

NORONHA, Gustavo Carneiro de; MONTEIRO, Luciane Pimentel Costa. Diagnóstico da vida útil e do balanço hídrico para o Lago de Juturnaíba, Bacia do Rio São João, Estado do Rio de Janeiro. *Engevista*, v. 15, n. 1, p. 28–35, 2013.

ORNELAS, Adilio Rodrigues. Aplicação de métodos de análise espacial na gestão dos resíduos sólidos urbanos. [S.l.]: [s.n.], 13 maio 2011.

PEREIRA, Luiz Firmino; CANEDO, Paulo; CAPODEFERRO, Morganna. Alternativas para incremento da segurança hídrica do Leste Metropolitano do Rio de Janeiro. [S.l.]: [s.n.], 2022.

RAJ, Saurabh; BANSAL, V. K. Use of GIS for selection of optimal route for water pipelines in hill areas. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 9, n. 1, p. 13, 16 dez. 2023.

ROSZKOWSKA, Ewa. Rank ordering criteria weighting methods – a comparative overview. *Optimum. Studia Ekonomiczne*, n. 5(65), p. 14–33, 2013.

SAATY, Thomas. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1, p. 83–98, 1 jan. 2008.

SAATY, Thomas L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1 jun. 1977.

SAATY, Thomas L. Some mathematical concepts of the Analytic Hierarchy Process. *Behaviormetrika*, v. 18, n. 29, p. 1–9, 1 jan. 1991.

SOUZA, Matheus Melo de; OLIVEIRA, Andréa Leda Ramos de; SOUZA, Marlon Fernandes de. Localização de armazéns agrícolas baseada em análise multicritério espacial. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 62, p. e268622, 5 maio 2023.

STILLWELL, William G.; SEAVER, David A.; EDWARDS, Ward. A comparison of weight approximation techniques in multiattribute utility decision making. *Organizational Behavior and Human Performance*, v. 28, n. 1, p. 62–77, 1981.

TAHA, Hamdy A. Pesquisa operacional. 8. ed. São Paulo: Editora Education do Brasil, 2008.

TANG, Gang et al. Geometric A-Star Algorithm: An improved A-Star algorithm for AGV path planning in a port environment. *IEEE Access*, v. 9, p. 59196–59210, 2021.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Abastecimento de água. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

WANG, Li et al. Transmission line route planning based on AHP-ACO algorithm. Journal of Physics: Conference Series, v. 2310, n. 1, p. 012014, out. 2022.

YILDIRIM, Volkan et al. An integrated spatial method for minimizing environmental damage of transmission pipelines. [S.l.]: [s.n.], 11 jun. 2016.