



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ARMANDO DIAS DUARTE

**PROPOSIÇÃO DE UM ALGORITMO METAHEURÍSTICO PARA O TRAÇADO
ÓTIMO DE ADUTORAS**

Recife
2023

ARMANDO DIAS DUARTE

**PROPOSIÇÃO DE UM ALGORITMO METAHEURÍSTICO PARA O TRAÇADO
ÓTIMO DE ADUTORAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Coorientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra.

Recife
2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

D812p Duarte, Armando Dias.
Proposição de um algoritmo metaheurístico para o traçado ótimo de adutoras / Armando Dias Duarte, 2023.
64 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.
Coorientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Abastecimento de água. 3. Caminho mínimo. 4. Algoritmo A-Star. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Bezerra, Saulo de Tarso Marques (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 177

ARMANDO DIAS DUARTE

**PROPOSIÇÃO DE UM ALGORITMO METAHEURÍSTICO
PARA O TRAÇADO ÓTIMO DE ADUTORAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Concentração Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 14/08/2023

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo – UFPE

Coorientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra - UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Leidjane Maria Maciel de Oliveira (examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Abdeladhim Tahimi (examinador externo)
Universidade Federal de Alagoas

participação por videoconferência

Prof. Dr. Francisco Jácome Sarmiento (examinador externo)
Universidade Federal da Paraíba

participação por videoconferência

Prof. Dr. Gilson Lima da Silva (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Hoje estou muito feliz em realizar o sonho de concluir o doutorado. Agradeço primeiramente a Deus, pelas suas bênçãos e provisões nos momentos mais difíceis, me proporcionando sabedoria, acalmando meu coração, com a sua infinita bondade. Agradeço também à minha família, a qual desempenhou um papel de extrema importância por todos esses anos, em especial, à minha esposa Deysianne, ao meu pai Armando, à minha mãe Tereza. Vocês são e foram a base para que esse sonho pudesse ser concretizado. Hoje, essa conquista não é só minha, mas uma realização conjunta, depois de tantos momentos de lutas, dificuldades, entre outras coisas, eles sempre foram minhas forças para continuar com a cabeça firme e sempre ser forte.

Agradeço também aos meus amigos e amigas, que ao longo dos anos fizeram/fazem parte de todo o processo até aqui. É um prazer poder contar com os mesmos, desde a época da graduação, mestrado e doutorado. Deus manda anjos para nos abençoar, e se ele coloca alguém em nossas vidas, é porque há um propósito. Espero tê-los abençoado também.

À Universidade Federal de Pernambuco, da qual sou fruto de um campus de interiorização, pelo Campus do Agreste (CAA), cujas condições anteriores me impediriam de cursar uma graduação e o mestrado em outras localidades. Hoje obtenho o título de doutor, em uma das maiores Universidades do mundo, cercado de muito orgulho. Sou eternamente grato aos professores Gilson Lima e Saulo de Tarso, por me acolherem e terem mostrado os caminhos da pesquisa e ensinamentos pessoais de vida. Agradeço também ao professor José Almir Cirilo, por ter me acolhido no doutorado, através da troca de experiências de vida, orientação e preciosas lições de vida. Agradeço também aos professores Abdeladhim e Francisco por toda a paciência e significativas contribuições com o trabalho desenvolvido.

O meu muito obrigado a todos e a todas por tornarem esse sonho, uma realidade. Hoje posso dizer que o filho de feirantes, torna-se doutor.

RESUMO

Em regiões onde o déficit hídrico é apresentado como um grande desafio, a busca por técnicas que permitam otimizar a infraestrutura hídrica é de grande importância para os gestores. O presente estudo visa obter o traçado ótimo de adutoras, através da adaptação do algoritmo A-Star (A*), doravante denominado de *Modified A-Star for Pipeline Routing* (MAPR), que opera em espaço de busca específico, constituído por variáveis tidas como mais influentes no processo de decisão da rota ideal, nominalmente, o comprimento da adutora e a potência requerida ao seu funcionamento. O algoritmo calcula a rota que minimiza a soma dos custos anuais, associados a cada uma das variáveis consideradas. Aplicações no mundo real atestam a viabilidade da aplicação do método proposto em apresentar resultados de interesse para projetistas de sistemas adutores. Para a validação do algoritmo, foram adotados três sistemas, cujos resultados computacionais indicam contribuições significativas para o auxílio na busca por traçados ótimos de adutoras.

Palavras-chave: abastecimento de água; caminho mínimo; algoritmo A-Star.

ABSTRACT

In regions where the water deficit is presented as a major challenge, the search for techniques that allow optimizing the water infrastructure is of great importance for managers. The present study aims to obtain the optimal layout of pipelines by adapting the A-Star (A*) algorithm, henceforth referred to as Modified A-Star for Pipeline Routing (MAPR), which operates in a specific search space, consisting of variables considered as most influential in the decision-making process of the ideal route, namely, the length of the pipeline and the power required for its operation. The algorithm calculates the route that minimizes the sum of annual costs associated with each of the considered variables. Real-world applications attest to the feasibility of applying the proposed method to present results of interest to pipeline system designers. For the validation of the algorithm, three systems were adopted, whose computational results indicate significant contributions to help in the search for optimal pipeline layouts.

Keywords: water supply; shortest path; A-Star algorithm.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Funcionamento do algoritmo A*.....	19
Figura 2 - Fluxograma do funcionamento do algoritmo A*	21
Figura 3 – Fluxograma das etapas do método PRISMA utilizada na identificação dos artigos para a tese	22
Figura 4 - Método da triangulação	28
Figura 5 - Resultados do método da triangulação	29
Figura 6 - Perfil topográfico do método da triangulação	29
Figura 7 - Exemplo hipotético utilizado para a validação do algoritmo.	41
Figura 8 - Procedimentos adotados para a escolha do caminho ótimo.	42
Figura 9 - Continuação dos procedimentos adotados para a escolha do caminho ótimo.....	42
Figura 10 - Resultado final para o valor de $DW = 1,0$	43
Figura 11 - Resultado final para o valor de $DW = 2,5$	43
Figura 12 - Superfície de custo anisotrópica.	44
Figura 13 - Área de interesse.....	46
Figura 14 - Resultados analíticos do comprimento da tubulação, em função da elevação.	47
Figura 15 - Teste com o $DW = 0,1$	48
Figura 16 - Resultados analíticos do comprimento da tubulação, em função da elevação da segunda aplicação.....	50
Figura 17 - Área de interesse da terceira aplicação.....	52
Figura 18 - Resultados analíticos do comprimento da tubulação, em função da elevação da terceira aplicação.....	53
Figura 19 - Pontos sugeridos para o novo caminho	56
Figura 20 – Resultado ótimo do caminho sugerido	57
Figura 21 - Perfil de elevação	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Artigos identificados com a temática da tese	23
Tabela 2 - Análise dos resultados da primeira aplicação	49
Tabela 3 - Análise dos resultados da segunda aplicação	51
Tabela 4 - Análise dos resultados da terceira aplicação	54

LISTA DE SIGLAS

A*	<i>A-Star</i> [A-estrela]
AG	Algoritmos Genéticos
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> [Processo Analítico Hierárquico]
BAGDA	Busca pelo Ajuste Geométrico da Despesa Anual
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
DEM	Modelo Digital de Elevação
MAPR	<i>Modified A-Star for Pipeline Routing</i> [A-star modificado para rota de Adutoras]
MDE	Modelos de Elevação
MDTS	Modelos Digitais de Terrenos
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PE 3D	Programa Pernambuco Tridimensional
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis</i> [Itens de Relato Preferidos para Revisões Sistemáticas e Meta-análises]
PSHPE	Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco
<i>QGIS</i>	<i>Software Quantum Gis</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i> [Missão de Topografia por Radar do Ônibus Espacial]

LISTA DE SÍMBOLOS

CS	Coeficiente de Sinuosidade
$g(n)$	Custo real
$h(n)$	Custo de avaliação
$f(n)$	Função para estimar o custo de deslocamento
d	Profundidade da busca realizada
DA_{total}	Despesa anual total
L	Comprimento da tubulação
DAU_t	Despesa Anual Unitária com a aquisição de tubos
DAU_e	Despesa Anual Unitária com Energia
H_g	Desnível geométrico
J_u	Perda de carga unitária
D	Diâmetro comercial
K_t	Componente anualizado
j	Taxa de juros de interesse
T	Tempo de diluição do investimento com a aquisição dos tubos
η	Desempenho do conjunto moto bomba
C	Coeficiente de rugosidade Hazen-Williams
Q	Vazão
C_1	Coeficiente proporcional
C_2	Coeficiente de proporcionalidade
$E_{consumption}$	Tarifa de consumo elétrico
n	Quantidade de horas de funcionamento diário do sistema de bombeamento ao longo de um ano
DW	<i>Destiny Way</i> [Caminho de Destino]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 HIPÓTESE	14
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.3 Objetivos específicos.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Sistemas Adutores	15
2.2 Sistemas de Informações Geográficas.....	16
2.3 Heurísticas e meta-heurísticas	17
2.4 O Algoritmo A-star (A*).....	18
2.5 Revisão sistêmica	21
2.5.1 Discussões sobre os artigos	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 Escolha do método e da função objetivo.....	37
3.2 Equações para o cálculo do custo do algoritmo proposto	37
3.3 Proposição do algoritmo MAPR	39
3.4 Dinâmica do algoritmo.....	39
3.5 Sistema de Informação Geográfico	43
3.6 Pré-processamento da imagem.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 Exemplo utilizado para a validação do algoritmo	45
4.2 Segunda aplicação	49
4.3 Terceira aplicação.....	51
4.4 Sugestões de caminhos.....	55
5 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Os grandes desafios enfrentados pelas sociedades no presente século estão relacionados à escassez de água, devido à contaminação de fontes e ao elevado uso dos recursos hídricos. Para solucionar este problema, alternativas sustentáveis são implementadas, a fim de otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos, com o objetivo de estabelecer o equilíbrio dos diferentes ecossistemas. Apesar da escassez de água ser sentida em todos os continentes, com 1,6 bilhão de pessoas sendo afetadas (UNDESA, 2016), é previsto que o aumento da demanda por água ocorrerá, principalmente, em países com economias emergentes ou em desenvolvimento (WWAP, 2018).

Dado a necessidade de melhorias nas políticas públicas, à escassez de recursos hídricos representa um problema que envolve algumas regiões do mundo, e para o auxílio e acompanhamento dessas metas e objetivos, a ONU propôs os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), compostos por 17 objetivos e 169 metas que devem ser alcançados até 2030. Essa proposta é uma continuidade dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) (Da Silva e Granziera, 2019). Dentre os ODS, o objetivo 6 trata da água potável e saneamento, visando garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água, bem como saneamento para todos. A meta 6.1 visa alcançar até 2030, o acesso universal e equitativo à água potável e segura, enquanto a meta 6.4, busca aumentar significativamente, a eficiência do uso da água em todos os setores, garantindo retiradas sustentáveis, o abastecimento de água doce para lidar com a escassez de água, reduzindo substancialmente o número de pessoas afetadas por esse problema (Agenda 2030, 2020).

Entre os desafios para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos, destacam-se: a alocação apropriada da água; sistemas eficientes de distribuição e preservação da qualidade da água superficial e subterrânea; a necessidade de estudos com objetivos múltiplos; restrições de recursos e requisitos de desenvolvimento sustentável (Silva; Cirilo e Dantas, 2011).

Quando a cidade, via concessionária dos serviços, não tem mais capacidade de fornecer água para a população, Tucci (2016) afirma que outros meios mais precários de se obter água terminam sendo adotados para algum tipo de atendimento mínimo, seja através da perfuração de poços individuais ou comercialização via carros-pipa, chafarizes públicos, captação de água da chuva, dentre outros procedimentos. Outro fator que contribuirá crescentemente para a redução da disponibilidade de água potável em os centros urbanos, será a combinação das

mudanças climáticas com fatores socioeconômicos (Liu *et al.*, 2017). Aliado a esse fato, a demanda crescente por água potável, fará com que as necessidades humanas sejam postas à frente dos quesitos ambientais, impondo-se como primeira estratégia à realocação e ao desvio dos fluxos das águas disponíveis para o atender das necessidades urbanas (Padowski e Gorelick, 2014).

No Brasil, Cirilo (2015) alega que outro fator agravante é a má distribuição na escala intra e inter-regional, cuja escassez e abundância afetam a população brasileira, cabendo destaque à região do Nordeste, sendo parte do seu território designado como semiárido. Por outro lado, segundo Verdaguer *et al.* (2017), à medida que o número de opções das diferentes fontes de água doce se torna significativo, se faz necessário o uso de ferramentas de otimização para a seleção da combinação mais adequada, obtendo-se acesso ao recurso.

As adutoras são estruturas cruciais para o abastecimento de água em áreas urbanas e rurais, contribuindo significativamente para a saúde pública e o bem-estar da população (WHO, 2019). Estudos demonstram que a construção de adutoras em regiões com escassez de água é uma medida eficaz para garantir o acesso à água potável e prevenir a propagação de doenças (Santos *et al.*, 2018). Além disso, as adutoras são consideradas uma medida de resposta rápida para garantir o acesso à água em situações de emergência, como desastres naturais (IWA, 2014). Por meio de técnicas de otimização do traçado de adutoras, permite reduzir os custos de construção e minimizar os impactos ambientais e sociais. A identificação de uma rota ótima leva em consideração fatores como topografia, características do solo e disponibilidade de água, visando garantir a eficiência do sistema (Faisal e Ahsan, 2018). Além disso, a aplicação de técnicas de otimização permite reduzir as perdas de água no sistema e melhorar a eficiência energética, reduzindo a resistência ao fluxo de água na adutora (Mirhassani e Afshar, 2019; Zhang; Wu e Liu, 2019).

Diante da falta de pesquisas na área de otimização do traçado de adutoras, este estudo tem como objetivo desenvolver um algoritmo baseado na heurística A-star, por meio de ferramentas computacionais, para auxiliar na análise de traçados de adutoras e contribuir para a melhoria da eficiência do sistema.

1.1 HIPÓTESE

A hipótese de pesquisa busca avaliar a eficácia do algoritmo *Modified A-Star for Pipeline Routing* (MAPR), como uma ferramenta alternativa para otimizar o traçado de adutoras de forma a garantir a segurança hídrica.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia com base em um algoritmo metaheurístico para otimizar o traçado de adutoras.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- ✓ Analisar o algoritmo por meio de testes em áreas distintas com diferentes características topográficas;
- ✓ Utilizar levantamento de alta resolução como base de dados para a aplicação do algoritmo proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir desse capítulo, serão demonstradas as revisões realizadas sobre os assuntos abordados ao longo da tese.

2.1 Sistemas Adutores

A palavra adução, tem origem na palavra em latim *adductio*, cujo significado remete à ação de conduzir. De acordo com Bezerra e Cheung (2013), a adução é “conjunto de tubulações, conexões e peças especiais destinadas a transportar água entre as unidades dos sistemas de abastecimento.” Nesse sentido, permite que o transporte da água da fonte (captação) até o sistema de tratamento. A principal norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) relacionada ao projeto de construção de Adutoras é a NBR 12.215 (ABNT, 1997), que leva em consideração algumas condições específicas para o traçado de adutoras, e entre elas, está o dimensionamento de forma correta dos diâmetros para condutos forçados, perdas de carga, declividade, vazão para o dimensionamento etc. de forma a se determinar a velocidade média de circulação da água (Gomes, 2001).

As adutoras podem ser classificadas conforme Bezerra e Cheung (2013), de acordo com a energia utilizada para realizar o movimento, sendo por gravidade, recalque e mista. O modo de escoamento do líquido que pode ser livre, forçado e misto. E por fim, o tipo de natureza da água, se ela é bruta ou tratada. Os materiais que são empregados para a construção dos condutos, são similares aos adotados nas redes de distribuição, e os fatores determinantes para a escolha, incluem: custo, condição de funcionamento hidráulico, a pressão interna e a durabilidade do material, a depender das condições do solo, as cargas externas e por fim, a natureza da água transportada.

Outro ponto a ser levado em consideração, na fase de planejamento, é o acúmulo de ar dissolvido na água, que acarreta a formação de bolsas de ar, que ficam localizadas nas partes mais altas das adutoras e faz com que ocorra a diminuição da vazão induzida, além de correr o risco de interrupção do funcionamento por golpes de aríete (Bezerra e Cheung, 2013). De forma a se minimizar o risco de falhas durante a fase de operação, a NBR 12.215/91 especifica que as tubulações horizontais devem ser evitadas, sendo trechos ascendentes com declividade não inferior a 0,2%, e nos trechos descendentes com declividades não inferiores a 0,3%, de forma que seja facilitado o escoamento do ar. Além disso, a norma indica que devem ser evitadas regiões pantanosas, áreas com elevadas declividades, áreas que sejam propícias a alagamentos e obstáculos que impeçam a construção e a manutenção. Logo, pensar em

métodos e ferramentas para a elaboração de traçados ótimos de adutoras, traz vantagens na redução do custo da aquisição de materiais dos tubos, redução de mão de obra, diminuição das perdas por meio da transmissão, de forma a proporcionar o serviço de abastecimento de água tratada no menor tempo possível (Kathuo e Mubea, 2016).

2.2 Sistemas de Informações Geográficas

De forma que seja utilizada uma base sólida altimétrica em escala global, em fevereiro de 2000, houve uma missão que contou com diversas instituições de pesquisa (inclusive a NASA), a qual durou 10 dias. Foram obtidos dados topográficos de alta resolução da superfície terrestre. A coleta dos dados ocorreu através do método de interferometria radar, por única passagem (um sistema de imageamento *radar Shuttle*), com espaçamentos de 60 metros (Cirilo *et al.*, 2014).

O uso dos SIGs, pode ser feito como ferramenta de suporte para a construção dos modelos, pois de acordo com Criollo *et al.* (2018), eles permitem a coleta, arquivamento, análise e visualização de dados espaciais e não espaciais em diferentes formatos. Alguns estudos foram conduzidos com a utilização de SIGs e modelagem numérica, em busca de modelos para o acesso a águas subterrâneas e superficiais (Chenini e Ben Mammou, 2010; Lee, Kim e Lee, 2018). Os usos de técnicas computacionais podem auxiliar no projeto de traçados de adutoras de forma a reduzir esforço físico, tempo e a quantidade de variáveis, encontradas no decorrer do planejamento e principalmente levar a soluções de menor custo.

Um exemplo é o Programa Pernambuco Tridimensional (PE 3D), que teve como origem, os eventos após as enchentes que atingiram os municípios da Mata Sul do estado de Pernambuco, nos anos de 2010 e 2011, quando foram realizados serviços de mapeamento das áreas afetadas, e da calha dos principais rios das bacias hidrográficas afetadas. Através da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE), realizou-se uma varredura a laser do terreno, da qual foram obtidas informações de altimetrias para projetos de barragens, prevenção e alerta de inundações. Posteriormente, o Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE), financiado pelo Banco Mundial, cujo objetivo do programa é ampliar o acesso da população à água potável e ao esgotamento sanitário, permitiu recursos para realizar o mapeamento de todo o estado de Pernambuco. Os trabalhos do PE 3D, tiveram início em janeiro de 2014, com os serviços de recobrimento aerofotogramétrico por meio de perfilhamento laser (através da tecnologia LiDAR), do território pernambucano, onde os

98.149 km² foram subdivididos em 12.192 folhas articuladas, agrupadas em cinco blocos (Cirilo *et al.*, 2015).

2.3 Heurísticas e meta-heurísticas

Para contextualizar o que são heurísticas, é importante saber que os problemas de otimização, de acordo Desale *et al.* (2015), podem ser divididos em duas categorias: uma delas que são os problemas exatos (que possuem soluções exatas), e a outra categoria de problemas aproximados, que possuem soluções aproximadas por meio de algoritmos de proximidade do resultado ótimo. Kokash (2005) define que as heurísticas são estratégias que usam informações prévias acessíveis, nem todas aplicáveis, para a resolução de problemas entre seres humanos e máquinas. Rott (2014) define heurística como um “termo coletivo para dispositivos, métodos ou ferramentas (cognitivas), muitas vezes baseado na experiência. Eles são usados sob a suposição de serem úteis na resolução de um problema (mas não garantem uma solução)”. O autor explica que existem heurísticas gerais que podem “trabalhar de trás para frente”, que trabalham em específico com domínios, como exemplo, pode ser mencionada, a redução de frações inicialmente etc. Essas formas de representação de heurísticas, têm como objetivo a redução dos esforços, através do estreitamento do espaço de busca, novas ideias (por meio da mudança da representação do problema), reestruturando os problemas, novas estratégias de avaliação, entre outras aplicações que visam um novo olhar sobre determinada problemática (Rott, 2014).

Desale *et al.* (2015) explicam que é uma técnica que permite resolver um problema de forma mais rápida, em comparação com os métodos de soluções clássicos, ou de forma a ser encontrada uma solução aproximada quando os métodos clássicos não conseguem. Contudo, deve ser prestada atenção nas soluções encontradas, que podem não serem consideradas ótimas, já que são algoritmos de soluções aproximadas. Em alguns casos, esses algoritmos podem encontrar a melhor solução, mas ainda continuam de caráter aproximado, até que essa solução ótima encontrada, seja comprovada como sendo melhor solução (Desale *et al.*, 2015).

Por outro lado, a meta-heurística é uma abordagem mais geral, que busca fornecer um método sistemático para resolver problemas de otimização sem se limitar a um problema ou restrição específica. São algoritmos adaptativos, que podem ser aplicados a diferentes problemas de otimização e permitem a exploração do espaço de soluções de forma mais ampla.

As meta-heurísticas podem ser usadas para lidar com problemas de otimização combinatorial, como roteamento, escalonamento, programação, entre outros (Blum *et al.*, 2011), conforme afirmado também por Ito e Tanaka (2023), que citam os Algoritmos Genéticos – AG, como facilitadores para a solução de problemas diferentes, mas com algumas similaridades. Nesse sentido, tanto as heurísticas, quanto as meta-heurísticas apresentam soluções de alta qualidade com um baixo consumo de recursos computacionais, como tempo de processamento e uso de memória (Rendon; Zuluaga e Ocampo, 2008).

2.4 O Algoritmo A-star (A*)

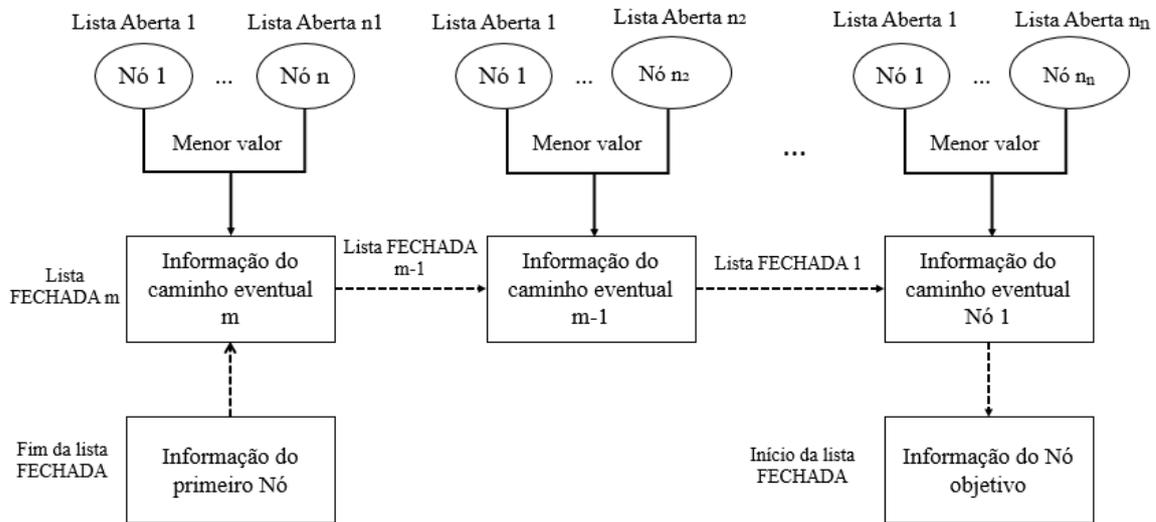
O algoritmo A-star (A*) foi proposto por Peter Hart, Nils Nilsson e Bertram Raphael em 1968, durante um projeto de pesquisa na área de inteligência artificial, no Stanford Research Institute (SRI), em Menlo Park, Califórnia. O objetivo original do algoritmo era encontrar rotas de menor custo, em um mapa para um robô móvel. O nome A-star é uma combinação das palavras "A" de "Algoritmo" e "Star" de "Estrela", que é uma referência ao fato de que o algoritmo usa em uma função heurística, para estimar o custo mínimo para alcançar o objetivo, formando uma espécie de "estrela", em torno do objetivo (Hart; Nilsson e Raphael, 1968).

Tang *et al.* (2021), explicam que os algoritmos de busca por caminhos mínimos são métodos de busca entre um ponto de partida e um ponto de objetivo, por meio de diferentes estratégias. Dentre elas estão os algoritmos de busca geométrica, que incluem o Algoritmo de Dijkstra e o Algoritmo A*. Os autores fazem uma diferenciação entre os algoritmos, exemplificando que o algoritmo de Dijkstra obtém o caminho mínimo percorrendo todos os nós, o que faz com que a taxa de sucesso da descoberta do caminho seja alta, contudo, a eficiência é baixa (Tang, 2021). Já o Algoritmo A*, é baseado no algoritmo de Dijkstra, com a adição de uma função heurística, esse algoritmo é simplificado e direto na resolução de problemas de caminho mínimo, porém o algoritmo é propenso a cair no ótimo local (Tang, 2021). Ambos os algoritmos são eficazes na detecção de obstáculos e trazem enquanto vantagens, a natureza determinística e o desempenho que não depende das soluções iniciais (Wang, 2021). De acordo com Tang (2021), esse algoritmo apresenta uma característica de ser rápido no processamento e desempenho em tempo real.

Fu *et al.* (2018) realizaram uma explanação a respeito do funcionamento do Algoritmo A*, o qual é um algoritmo de busca informada que resolve diversos problemas para achar a solução ótima de possíveis rotas mínimas. Ele realiza a visita em cada nó inicial até o nó de

destino, utiliza a informação heurística para orientar a performance, considerada superior a outros algoritmos de busca. A chave para o sucesso do algoritmo está relacionada à lista ABERTA e à lista FECHADA, bem como, a função heurística $f(n)$, a qual avaliará o menor valor entre os nós (Kala; Shukla e Tiwari, 2011; Persson e Sharf, 2014). Essa lista ABERTA é estabelecida para o armazenamento dos nós candidatos e a FECHADA armazena os nós selecionados, que compõem o caminho final (Fu *et al.*, 2018). O processo de escolha é feito da seguinte forma: os menores valores encontrados por meio da função objetivo dos nós avaliados nas vizinhanças são armazenados na lista ABERTA, após a escolha, os nós selecionados são armazenados na lista FECHADA, onde são armazenados os nós selecionados para compor o caminho final. Essa transferência para a lista FECHADA faz com que o nó transferido seja o nó atual, logo após, o processo é repetido até que o nó objetivo seja alcançado (Fu *et al.*, 2018). Para melhor visualização, a Figura 1 demonstra os passos descritos anteriormente:

Figura 1 - Funcionamento do algoritmo A*.



Fonte: Adaptado de Fu *et al.* (2018).

A função avaliação $f(n)$ é utilizada como uma estimativa para avaliar a importância do nó n candidato no caminho, do ponto inicial s até o nó destino g . A função é calculada a partir da Equação 1:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

A Equação 1 apresenta a função custo do caminho que é composta por duas partes: o custo real $g(n)$, do caminho percorrido desde o nó inicial s até o nó atual n e a avaliação do

custo $h(n)$ do caminho ótimo do nó n até o nó de destino g . O custo real $g(n)$ é uma medida conhecida, enquanto a avaliação de custo $h(n)$ é um fator determinante na função avaliação $f(n)$, como apontado por Fu *et al.* (2018).

O custo real $g(n)$ pode ser calculado de acordo com a Equação 2. Ele realiza a busca profunda do nó atual n , que leva em consideração o número de nós do caminho inicial s para o nó atual n . O valor de d corresponde à profundidade da busca realizada:

$$g(n) = d \quad (2)$$

O custo de avaliação $h(n)$ é descrito por meio da Equação 3, cuja distância Euclidiana é realizada entre o nó atual n até o nó de destino g . Onde $p(g)$ e $p(n)$ representam as respectivas coordenadas de destino e origem. A junção dessas avaliações, compõem a função avaliação $f(n)$. Esse parâmetro é responsável pela ponderação até o ponto de destino, tornado o Algoritmo A*, um algoritmo que orienta a busca informada (Sarmiento, 2022b):

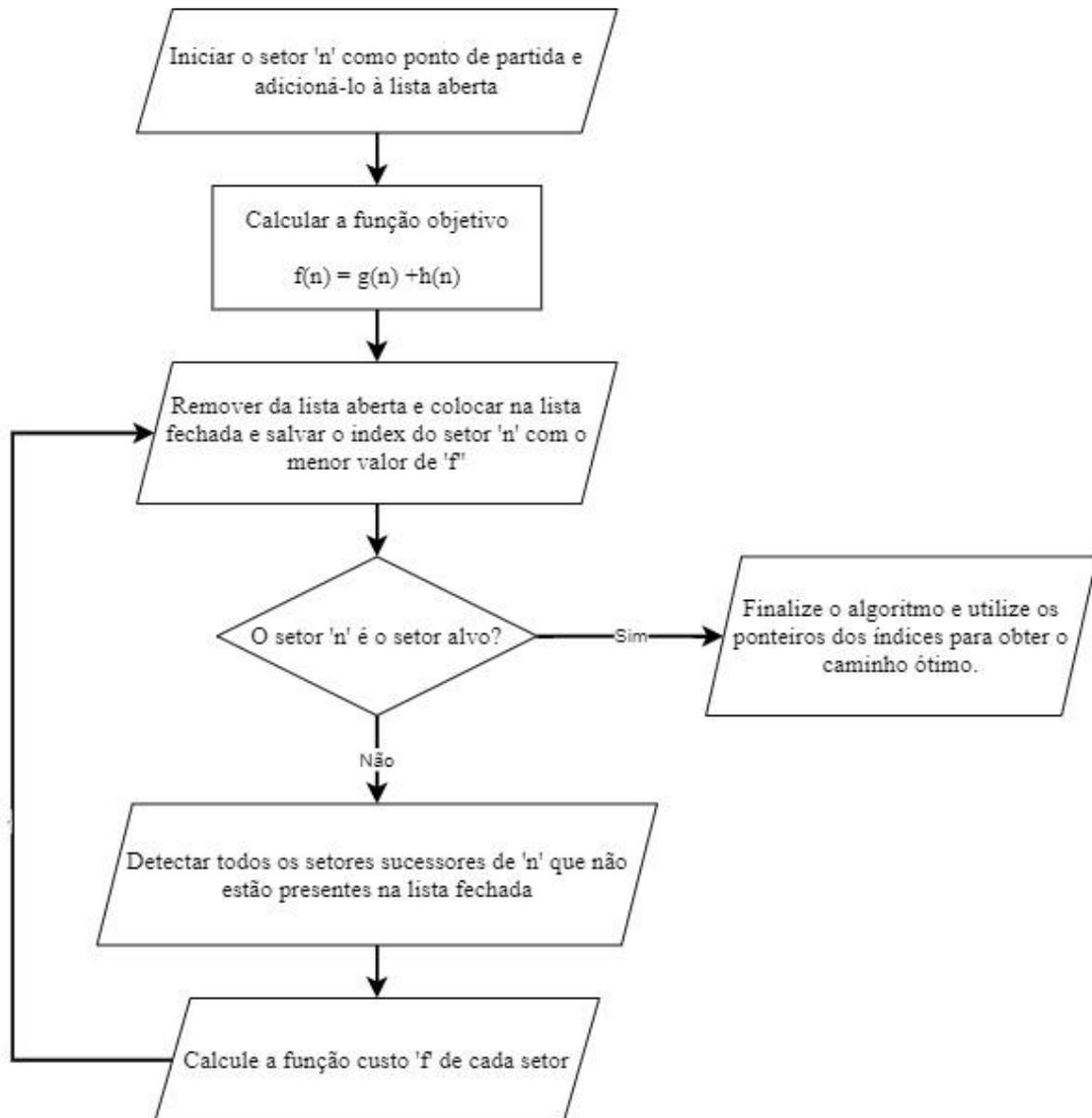
$$h(n) = \|p(g) - p(n)\| \quad (3)$$

$$h(n) = \sqrt{(x_g - x_n)^2 + (y_g - y_n)^2}$$

O algoritmo A* pode ser encontrado em diversas aplicações, algumas delas com modificações a respeito das problemáticas encontradas (Howden, 1968; Rana e Zaveri, 2011; Liu, e Gong *et al.*, 2011; Duchoň *et al.*, 2014; Goyal *et al.*, 2014; Siregar *et al.*, 2017; Fu *et al.*, 2018; Zidane e Ibrahim, 2018; Zhao *et al.*, 2019; Bernal e Nesmachnow, 2020; Candra; Budiman e Pohan, 2021; Tang *et al.*, 2021; Sarmiento, 2022a; Liu, 2023).

Para uma melhor compreensão do funcionamento do algoritmo A*, Zidane e Ibrahim (2018) elaboraram um fluxograma, descrito através da Figura 2:

Figura 2 - Fluxograma do funcionamento do algoritmo A*

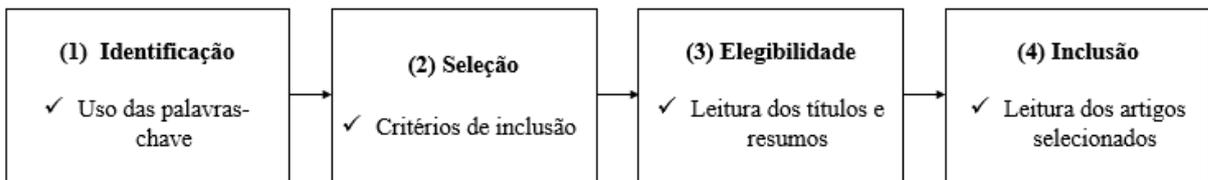


Fonte: Zidane e Ibrahim (2018).

2.5 Revisão sistêmica

Com o propósito de compreender o emprego da temática de elaboração de traçados de adutoras, uma pesquisa sistemática na literatura foi realizada, fundamentada no método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis* (PRISMA), que se divide em quatro etapas: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão, descritas pelo fluxograma da Figura (Nascimento; Canteri e Kovaleski, 2019). Alguns estudos aplicaram essa metodologia para abordar diversas temáticas, visando a sistematização de trabalhos (Urrútia e Bonfill, 2010; Lima *et al.*, 2018).

Figura 3 – Fluxograma das etapas do método PRISMA utilizada na identificação dos artigos para a tese



Fonte: O autor (2023).

Inicialmente, para a busca na base de dados, a plataforma Scopus foi escolhida através do portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). As palavras-chave "*Pipeline*", "*Optimization*" e "*Water Distribution Systems*" foram utilizados com o operador booleano "*and*", resultando em 354 artigos e 4 capítulos de livros, incluídos entre os anos de 1970 e 2023. Na primeira rodada, os critérios resultaram em aplicações variadas, incluindo o controle de pressão, estimativa de diâmetro ótimo, redes de abastecimento, irrigação, traçado de estradas, uso para caminhos ótimos de gasodutos, etc. Na etapa seguinte, novos critérios foram aplicados, incluindo as palavras-chave "*Water pipelines*", "*Design*" e "*Hydraulics*". Após a nova filtragem, foram obtidos 133 artigos. Em seguida, os títulos e informações adicionais foram exportados para análise no *software* Excel.

Na terceira etapa da Elegibilidade, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos dos artigos, tendo sido aplicados critérios de seleção baseados em dois questionamentos:

1. O estudo está em consonância com o tema abordado?
2. O estudo apresentou métodos de otimização para traçados de adutoras?

Após o uso dos novos critérios, foram obtidos 4 artigos (compreendidos entre 2005 até 2022). De forma a aumentar a quantidade de trabalhos pesquisados, optou-se por utilizar outra plataforma de divulgação de pesquisas científicas, a plataforma *ResearchGate*, fundamentando-se também em autores como: Amaral; Cirilo e Ribeiro Neto (2020) e Sarmiento (2012), os quais corroboram com as perguntas do critério Elegibilidade. Dessa forma, foram utilizadas as opções de artigos similares para compor as discussões, totalizando 17 artigos. Os artigos encontrados são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Artigos identificados com a temática da tese

Autores	Título	Heurística /Ferramenta utilizada/Técnica
Luettinger e Clark (2005)	Geographic Information System-based Pipeline Route Selection Process	GIS <i>software</i>
Hardin; Bridges e Rundell (2008)	Selecting the best pipeline route based on facts not feelings	Função utilidade + Análise de sensibilidade
Ebrahimipoor <i>et al.</i> (2009)	Routing of Water Pipeline Using GIS and Genetic Algorithm	GIS + Algoritmos Genéticos
Salah e Atwood (2011)	Pipeline Alignment Optimization: Automated GIS-Based Approach	ArcGIS <i>network analyst</i> + <i>Microsoft Office</i> (Excel) + VBA
Sarmiento (2012)	Um Algoritmo Metaheurístico de Apoio à Otimização do Traçado de Adutoras	Método da triangulação
Maughn e Byrnes (2013)	Challenges in Completing a Large Diameter Water Transmission Pipeline	Ferramentas e conhecimento prévio de outras obras do mesmo segmento
Mohammed e Majid (2014)	Design of Optimal Water Distribution Network using Geographic Information System in Yola Nigeria	ArcGIS <i>network analyst</i>
Suleiman <i>et al.</i> (2015)	Optimal Route Location by Least Cost Path (LCP) Analysis using (GIS), a case study	ArcGIS <i>network analyst</i>
Kathuo e Mubea (2016)	Application of GIS Technologies in Optimal Routes Modelling of Water Utilities to Spur Development	Erdas + ArcGIS <i>network analyst</i> + método AHP
Roy <i>et al.</i> (2016)	Use of Remote Sensing and Geospatial Technique for Pre-feasibility Analysis of Rural Water Pipeline Grids	<i>Quantum GIS (profiletool)</i> + Plataforma online de Geoprocessamento
Arabi e Ghareh Hassanloo (2018)	Application and Comparison of Analytical Hierarchy Process (AHP) and Network Methods in Path Finding of Pipeline Water Transmission System, from Taleghan's Dam to Hashtgerd New City, Tehran, Iran	ArcGIS <i>network analyst</i> + <i>IDRISI Selva</i> + AHP
Albiero <i>et al.</i> (2018)	Economic feasibility of underwater adduction of rivers for metropolises in semiarid coastal environments: case studies	Valor presente líquido, taxa de retorno interna e <i>payback</i>
Amaral; Cirilo e Ribeiro Neto (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 <i>software</i> + método Delphi + método <i>Analytical Hierarchy Process</i> (AHP)
Cruz-Chávez <i>et al.</i> (2020)	GIS Spatial Optimization for Corridor Alignment Using Simulated Annealing	Simulated Annealing (SA)
Simon; Japheth e Mohammed (2021)	Selection of the Shortest Route of Transporting Water from Yola Water Service Station to Yolde Pate, Adamawa State	ArcGIS <i>network analyst</i>
Jain <i>et al.</i> (2021)	Water Pipeline Routing Using GIS	ArcGIS <i>network analyst</i>
Sarmiento (2022)	Automatic Routing of Water Supply Pipelines	Algoritmo BAGDA baseado no A*

Fonte: O autor (2023).

No tópico a seguir, serão discutidas as metodologias e principais resultados encontrados pelos artigos utilizados para o estudo.

2.5.1 Discussões sobre os artigos

Luettinger and Clark (2005), conduziram um estudo no Distrito Metropolitano de Salt Lake e Sandy, onde foi iniciada a construção de um Aqueduto Subterrâneo, com uma extensão aproximada de 9 a 12 km. De acordo com o Plano Mestre das cidades, em 1998, havia uma necessidade prevista para 2025, de um aumento de 3,1 m³/s no transporte e tratamento de água potável para atender às respectivas populações. A elaboração do projeto teve início em 2001, tendo como objetivo principal, a seleção de uma rota viável de tubulação que ligasse a Estação de Tratamento de Água, situada entre 9 a 12 km, a pontos intermediários de entrega, minimizando os impactos sociais e os custos relacionados à tubulação. Durante a elaboração do projeto, a equipe enfrentou o desafio de construir o aqueduto, passando por ferrovias, canais, riachos, parques, áreas urbanas, áreas sensíveis e zonas sísmicas. A seleção das melhores rotas foi realizada através do uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), com base em um banco de dados composto por mapas digitais, incluindo informações físicas (estradas, canais), políticas demográficas (estabelecimentos residenciais e comerciais), topológicas (elevação) e outras características, como zonas de abalos sísmicos. Após a composição do banco de dados, foi criado um mapa de utilidades, compilando todas essas informações. Segundo a reportagem do jornal eletrônico KSL (2007), o projeto foi concluído no ano de 2007, após ter sido iniciado em 2004. Ele resultou na adição de 26.4978,82 metros cúbicos de água tratada por dia. O traçado final teve um comprimento de 12 km e foi orçado em 250 milhões de dólares americanos, com os pontos de captação de água, sendo *Little Cottonwood Creek* e o Reservatório *Deer Creek*. Este empreendimento representa uma investigação interessante, a qual abrangeu uma série de variáveis que englobam aspectos da área de engenharia, bem como aspectos sociais, a fim de determinar o melhor curso de ação.

De acordo com o estudo realizado por Hardin; Bridges e Rundell (2008), próximo a uma região metropolitana no centro do Texas, uma solução foi buscada para atender às necessidades hídricas das cidades *Cedar Park*, *Leander* e *Round Rock*. Em 2006, as cidades concordaram em criar a *Brushy Creek Regional Utility Authority* (BCRUA), tendo como ponto de captação, o lago Travis. O estudo destaca que, semelhante ao que ocorre em qualquer análise de rotas de adutoras, há uma grande quantidade de alternativas. Por esse

motivo, alguns critérios básicos de triagem foram estabelecidos para limitar essas alternativas). Os critérios incluíram: (i) o limite superior do custo de capital (qualquer construção que envolva questões subaquáticas ou túneis foi desconsiderada); (ii) o comprimento total da adutora (qualquer alternativa com comprimento total maior que duas vezes a distância aproximada em linha reta, a qual era de aproximadamente 7,32 km, foi desconsiderada); (iii) impactos na área ambiental local (qualquer traçado que atravessasse a grande reserva ambiental conhecida como *Balcones Canyonland Preserve* foi desconsiderado); e por fim, (iv) restrições de limite de propriedade (qualquer traçado que se estendesse por uma grande área privada foi desconsiderado). Após a identificação das alternativas para a rota, a equipe responsável pelo projeto estabeleceu quatro objetivos e critérios para a seleção da rota final.

O primeiro objetivo é o menor custo, incluindo considerações sobre mitigação, serviços, licenças, entre outros fatores. O segundo objetivo se concentra na minimização dos problemas durante a fase de construção, incluindo o número de proprietários afetados pelo empreendimento, escolas, empresas, fechamento de estradas e outros fatores. O terceiro objetivo é a minimização do impacto ambiental, com o objetivo de evitar a perturbação de habitats naturais. Por fim, o quarto objetivo é o menor número de licenças e permissões necessárias para o empreendimento, com o objetivo de avaliar as alternativas, através da consulta de diferentes especialistas das três cidades. Posteriormente, foram atribuídos pesos e médias às medidas, de modo a permitir que as decisões lógicas permitissem a classificação das preferências em uma tabela para seguir com uma análise. Por meio das diversas alternativas, foi escolhido o melhor traçado. Atualmente, de acordo com as informações da BCRUA (2022), o empreendimento está na sua segunda fase, com captação de água bruta através de duas entradas de lagos, que são conectados a um túnel por gravidade e transportam 548.884,70 m³ de água bruta por dia, para uma estação de bombeamento.

Ebrahimipoor *et al.* (2009) realizaram o estudo do traçado de adutora de água, entre a cidade de Qom e a barragem de Panzdahe Khordad, no Irã. A região do estudo, possuía um tamanho de 10 x 10 m de resolução e a dimensão total do recorte da área, incluiu uma matriz com dimensões de 6000 x 4000 em relação à escala dos dados utilizados. Por meio de AG, os autores puderam comparar o caminho ótimo resultante do algoritmo, com a adutora já construída. Constataram que o caminho de menor custo não se sobrepõe ao caminho construído, sendo o caminho ótimo mais barato (cerca de 20%). Essa redução de custo ocorre devido ao menor comprimento da adutora e a menos interseções com rios e estradas. Os

autores apresentam algumas desvantagens no uso do método proposto que são: i) número alto de operações das matrizes envolvidas: cuja porcentagem da memória é ocupada por matrizes e vetores necessários, limitando o software/hardware; ii) truques de software: uso de subprogramas para operações do algoritmo; e por fim iii) o tempo de execução do programa é mais longo do que métodos que utilizam fórmulas de aproximação.

O trabalho de Salah e Atwood (2011), apresenta um avanço nos estudos de soluções ótimas para infraestrutura hídrica, por meio da aplicação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), para análise e classificação de rotas de adutoras. A abordagem se baseia na acumulação de pesos dos segmentos que compõem a rota, utilizando a classificação proposta pela ASCE (1998), para distinguir os termos tubulação, alinhamento de tubulação, corredor e rota.

O conceito de alinhamento é definido como a localização atual de um traçado real, enquanto o corredor é uma faixa de terra de largura variável, que conecta uma fonte a um ponto de entrega, com 1 a 3 km (1/2-2 mi de largura), e onde estão localizadas uma ou mais instalações de serviço público. A rota, por sua vez, é uma faixa de terra de largura variável (300 a 400 m e 304,8 m a 1/4 mi de largura) dentro de um corredor, onde é possível localizar uma adutora.

Como ferramenta computacional, os autores utilizaram o pacote de *Network Analyst*, disponibilizado pelo *software* comercial ArcGIS, que é capaz de criar um ponto inicial e um ponto de captação, cuja capacidade de analisar a distância entre eles é demonstrada após a inserção de camadas e restrições geográficas (ESRI, 2010). Os autores utilizaram *scripts* que compõem os *ArcObjects*, que contém bibliotecas e pacotes para automatizar o processo em conjunto com aplicação em *Visual Basic for Application* (VBA), para o desenvolvimento de uma aplicação, os autores afirmam que o uso do VBA, foi por que ele tem uma facilidade com o uso dos produtos ESRI's ArcGIS e *Microsoft Office* (Salah e Atwood, 2011).

O processo automatizado permitiu com que fossem modelados e implementados em planilhas da *Microsoft Excel*, os fatores da ponderação subjetiva. Foram utilizados três critérios principais: restrições, socioeconômicos e custo. Os autores indicam que há inúmeros métodos para achar a solução ótima de um corredor e que qualquer *software* GIS pode ser feito por meio de um vetor ou análise baseada em pixels do *raster* (Salah e Atwood, 2011).

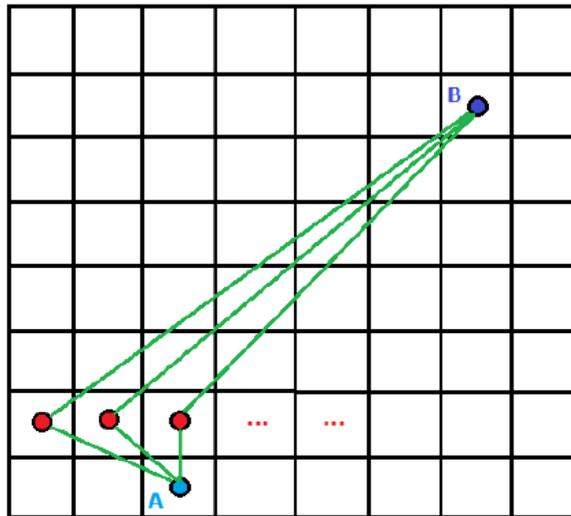
No estudo em questão, foi utilizada a análise de vetores e o complemento ArcGIS *network analyst*. Para realizar os cálculos da rota mínima, o algoritmo utilizado pela ArcGIS *network analyst* tenta encontrar uma rota através de um conjunto de paradas com o mínimo de impedimentos. Esse fator de impedimento pode ser o tempo de viagem entre a rede, como também pode ser uma pontuação do segmento da rede. O algoritmo é baseado nos preceitos de Dijkstra (1959), que primeiro calcula um destino assimétrico por meio de uma matriz de custo entre os pontos de início e fim. O algoritmo quebra a rede em nós, cujas linhas se unem aos pontos de início e fim. Cada linha possui um custo associado, e diversos caminhos possíveis entre a origem e destino, porém o caminho calculado depende de quais nós, são visitados e a em qual ordem (Salah e Atwood, 2011).

Para compor o custo do traçado, o algoritmo do ArcGIS *network analyst*, aplica uma inserção para construir uma solução inicial, e a cada passo, o algoritmo de inserção, insere a parada não visitada de menor custo na solução parcial atual (Salah e Atwood, 2011). A caracterização da rede de tubos foi realizada por meio de fotos aéreas dos segmentos que ligavam os pontos de origem e fim. Em seguida a matriz de decisão foi elaborada, levando em consideração os pesos importantes para a agência governamental. Os resultados obtidos foram disponibilizados em duas saídas, uma elas espacial (através da rota ótima) e tabular (por meio de planilhas da *Microsoft Excel*). Os autores recomendam o uso de recursos computacionais adequados em casos de modelagem mais complexa para reduzir o tempo de processamento. Eles apontam o uso de um algoritmo de melhor rota hierárquica, como uma alternativa que consumiria menos tempo e recursos, mesmo tendo obtido 4 possíveis rotas ótimas no estudo.

Sarmiento (2012) apresenta um algoritmo metaheurístico de busca do traçado ótimo de adutoras, considerando custos de passagem através do reticulado derivado do modelo digital de terreno. Denominado pelo autor como “método da triangulação”, o algoritmo usa como informações iniciais, além das cotas topográficas da área de interesse, a localização dos pontos de captação (ponto A), e de entrega (ponto B), da água. Conforme mostra a Figura 1, a busca inicia no ponto A e avança, explorando triangulações, entre a retícula de partida e cada uma das retículas dispostas no alinhamento adjacente, na direção do ponto de entrega da água (ponto B), formando assim, o primeiro cateto do triângulo. O segundo cateto será formado, interligando-se cada retícula adjacente com o ponto B. Ao longo dos dois trajetos retilíneos constitutivos de cada triangulação, é identificada a máxima cota topográfica, bem como calculado o comprimento total dos dois catetos. Com essas duas informações, pode-se calcular os custos de passagem em se adotar cada uma dessas rotas, sendo escolhida aquela

que apresentar o menor custo total. Uma vez identificado o vértice da rota mais econômica, este passa a ser o novo ponto de partida do processo algorítmico, que somente se encerra quando alcançado o ponto de entrega da água. A busca é realizada tanto na direção vertical, conforme exemplifica a Figura 4, como na direção horizontal, onde as retículas adjacentes encontram-se dispostas na forma de colunas, na grade ilustrada na referida figura.

Figura 4 - Método da triangulação

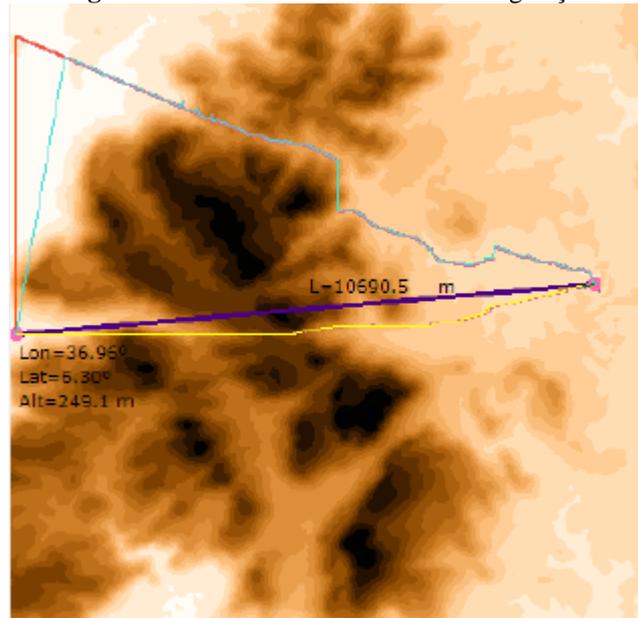


Fonte: Sarmento (2012).

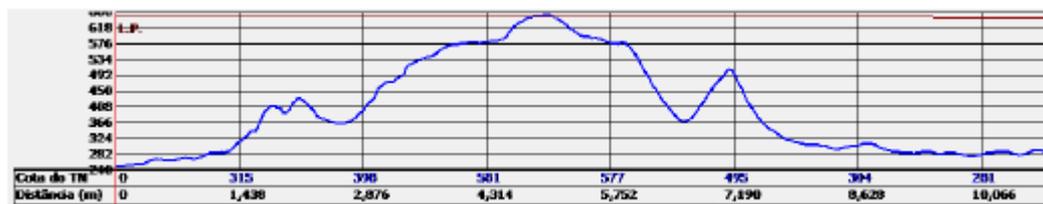
A fórmula para o cálculo do custo total proposto por Sarmento (2012), é calculada pela adição dos custos fixos e variáveis de duas maneiras. A primeira consiste na anualização dos custos de investimento, na aquisição dos tubos necessários para a construção da adutora. A segunda consiste na conversão da parcela dos gastos com energia elétrica, em um valor presente de capital. A formulação completa do custo total é apresentada na Equação 4.

$$C_{total} = C_{tubos} + C_{energia} \quad (4)$$

De acordo com Sarmento (2012), para avaliar a eficácia do método da triangulação proposto, uma região montanhosa foi escolhida para teste devido à dificuldade em encontrar um traçado otimizado em tal tipo de relevo. O autor codificou o algoritmo em Visual Basic e o programa é capaz de processar dados de localização de pontos de captação e entrega, além de produzir imagens, incluindo o perfil topográfico da rota considerada ótima, como apresentado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Resultados do método da triangulação

Fonte: Sarmento (2012).

Figura 6 - Perfil topográfico do método da triangulação

Fonte: Sarmento (2012).

O autor conclui que o algoritmo proposto não garante ser a rota determinada aquela correspondente a da tomada de decisão globalmente ótima, dada a forma como o algoritmo procede a sondagem do espaço de busca. Entretanto, as soluções obtidas refletem a otimicidade das rotas em termos das variáveis mais significativas da economicidade de projetos dessa natureza.

Maughn e Byrnes (2013) no respectivo estudo, detalharam os problemas preliminares e finais do traçado de uma tubulação de 84 polegadas através de propriedades rurais, urbanas e uma propriedade militar do exército americano, no Distrito Municipal de Água do Norte do Texas (DMANT), em 2002. Esse empreendimento teria como objetivo atender as demandas hídricas da população do Norte do Texas.

O nome do projeto foi Allen/Plano/Frisco/Mckinney, adutora (APFM), cujo funcionamento estava previsto para o ano de 2010. Estava prevista a construção de 32,18 km de tubulação de 213,36 cm a 182,88 cm de diâmetro. Os projetistas também tiveram

dificuldades, pois a área de construção era considerada uma das mais congestionadas da área do Norte do Texas. Por questões técnicas, o projeto foi dividido em quatro partes a serem realizadas por sucessão. Em 2007, três partes foram concluídas, sendo que em 2008, a quarta fase (final) teve início, que levaria até a estação de tratamento de água e que exigiria um grande esforço de bombeamento.

Na seleção preliminar do traçado, foram considerados os impactos do acesso ao terreno, uso e ocupação do solo, impactos ambientais, a propriedade militar e os possíveis congestionamentos com outras redes de tubulações. Após a análise de três cenários, que levaram em consideração também a mudança no diâmetro da adutora, a melhor opção (combinação entre a alternativa dois e três), foi escolhida após muitas iterações e discussões com o DMANT e a empresa responsável pela obra e por meio de ferramentas, possuindo também, o conhecimento a partir de outros projetos. O empreendimento foi construído em outubro de 2011, e as conexões foram completadas em fevereiro de 2012. O projeto foi concedido com uma adutora de 243,84 cm de diâmetro e US\$ 21,9 milhões, com uma extensão de 8,69 km.

Mohammed e Majid (2014), utilizaram a aplicação do ArcGIS *network analyst*, para determinar o ótimo no sistema de distribuição de água em Yola, Nigéria. Os autores utilizaram cinco conjuntos diferentes de banco de dados: dados terrestres, tubulações já existentes, uso e ocupação do solo, topografia e dados da população. Por meio do conjunto desses dados, os autores criaram os componentes que fizeram parte da rede. A rede atual de distribuição, foi digitalizada em um *Digital Elevation Model* (Modelo Digital de Elevação) – DEM. Os locais dos reservatórios foram determinados a partir da análise dos fluxos através da gravidade, por meio do DEM, e a melhor rota foi determinada por meio do conjunto de dados anteriormente desenvolvido. Por fim, os autores concluem que o uso da ferramenta ArcGIS *network analyst* em conjunto com DEM, determinam uma ótima análise para otimização de sistemas de distribuição de água.

No estudo conduzido por Suleiman et al. (2015) nas cidades de Gaya e Hamdullahi, no estado de Kano, Nigéria, o caminho ótimo foi investigado através do uso do software ArcGIS Network Analyst, considerando fatores como uso do solo, declividade e tipos de solo. Para a construção do banco de dados e sua conversão em modelo raster, imagens de satélite do LandSat8, modelos de DEM obtidos do gdem.ersdac.jspacesystem.or.jp e dados governamentais foram empregados. O processo de composição do banco de dados envolveu

pré-processamento de imagens vetoriais e raster no ArcGIS, representando o espaço geográfico através de uma grade, com células de 30 m x 30 m, e subdividindo os dados em blocos para análise. Três modelos de caminhos ótimos foram identificados, com destaque para o Modelo 1 (31,96 km), que considerou predominantemente o uso do solo e atraiu maiores custos de compensação devido à extensão. Embora com uma distância menor, o Modelo 2 (27,95 km) baseou-se na declividade do terreno e tipos de solo, potencialmente resultando em custos mais elevados devido à passagem por terras particulares. O Modelo 3, uma combinação dos três fatores, abordou os mesmos trechos que o Modelo 2, mas evitou áreas construídas e terras agrícolas, resultando em um percurso de 27,73 km. A preferência pelo Alinhamento 1, dentro do Modelo 1, foi determinada após uma análise de preferências que considerou manutenção, distância e conectividade, indicando a importância de considerações além da distância na escolha do caminho ótimo. Para futuros estudos, sugere-se a integração dos resultados com um software de projeto de estradas, incorporando fatores adicionais como drenagem e litologia.

Kathuo e Mubea (2016), estudaram a avaliação e o desenvolvimento do caminho ótimo para os serviços de água no distrito de Mumoni, no condado de Kitui, Quênia, cujo clima predominante é o semiárido. Para realizar tal feito, os autores desenvolveram camadas *raster*: rios, precipitação, linhas de água, solos, uso e ocupação da terra, mercados e declividade, similar ao trabalho desenvolvido por Mohammed e Majid (2014), porém, com algumas adições, que permitissem a conexão com todas as escolas da região, foi possível obter os pesos para a construção das camadas *raster*, os autores utilizaram a metodologia de tomada de decisão multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Saaty (1991), que consiste na decomposição e a síntese de relações entre os critérios, com o objetivo de priorização dos indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho (SAATY, 1991). Os referidos autores até citam Shukla e Radadiya (2013), os quais informam que o método AHP apresenta falhas como forma reverter as alternativas e outras críticas, mas que continua a ser o método mais aceitável. A superfície de custo foi gerada por meio da combinação dos dados, através da sobreposição ponderada das camadas *raster*, que definiu por meio dos reservatórios existentes (caixas d'água), como a fonte de captação e as escolas como pontos de destino final. Os autores recomendam que sejam feitas mais pesquisas, no intuito de estabelecer mais reservatórios adicionais para cobrirem uma maior área de forma que seja estabelecida uma nova rota de adutora.

Roy *et al.* (2016), utilizaram o *software Quantum QGIS* para o estudo de uma adutora hipotética por meio da plataforma online de dados geográficos, através de código aberto *Bhuvan Indian Geo-Platform of ISRO* (<https://bhuvan.nrsc.gov.in/home/index.php#>). Para compor o banco de informações, os autores utilizaram imagens topográficas do satélite *Cartosat-1* (MDT de 30 m de resolução), informações geomorfológicas e uso e ocupação do solo por meio de imagens do satélite *Resourcesat-2 LISS III*. A adutora fictícia foi criada ligando algumas cidades e uma única fonte de captação. Após a criação da adutora, os autores integram por meio de arquivo *shapefile* no QGIS para visualizarem por meio do *plugin profiletool*. Os autores realizaram algumas mudanças no traçado da Adutora e concluíram que o exercício hipotético pode ser realizado por meio do QGIS e o portal Bhuvan, o que contribui com a elaboração prévia e o conhecimento do perfil de construção de uma forma ágil. Os autores recomendam que em um futuro seja customizado para outras atividades de rotas.

O estudo de Arabi e Ghareh Hassanloo (2018), foi a descoberta do traçado ótimo por meio do *software ArcGIS* com a extensão da *network analyst*. Os autores realizaram um estudo de caso da adução da represa de Taleghan até a cidade de Hashtgerd New City, Irã. A metodologia adotada foi similar ao trabalho de Kathuo e Mubea (2016), que contou também com o uso do método multicritério AHP, para os pesos que fizeram parte da superfície de custo. Os autores recomendam que cada região possui características especiais e que outros métodos, como por exemplo, o de algoritmos genéticos sejam usados em trabalhos futuros.

Albiero *et al.* (2018), abordam o problema de adução entre cidades litorâneas, através da captação de água potável, por meio da condução abaixo do nível da água, utilizando rios próximos ao semiárido. No estudo, os autores estimaram por meio do Valor presente, a taxa interna de retorno para as cidades de Fortaleza (Brasil), Dalian (China), Tel Aviv (Israel) e Gaza (Palestina). A escolha das cidades se deu pelo fato de apresentarem características climáticas semelhantes, pois estão localizadas em regiões semiáridas e que sofrem pelos efeitos das mudanças climáticas. Para os cálculos dos diâmetros da tubulação subterrâneas, os autores levaram em consideração outros estudos e metodologias.

Para a taxa de fluxos, com base de valores de velocidades normalizados e o cálculo do custo relacionado com a tubulação, foram baseadas: variação linear e derivação da função de custo para o valor mínimo, através da consulta da ENCE (2018). O peso do tubo foi determinado a partir da derivação do diâmetro ótimo, baseado em termos econômicos, através da metodologia proposta por Gomes (2001). O procedimento para o cálculo de condutos

forçados foi escolhido nas recomendações de Heller e Pádua (2006), que apontam a equação universal de Bresse. Após a apresentação dos diferentes cenários, os autores concluíram que a cidade de Fortaleza obteve uma viabilidade econômica sob algumas restrições; Tel Aviv e Gaza possuíam uma grande viabilidade, contudo, se a cidade do Egito concordasse em fornecer água através do rio Nilo; Dalian apresentou o resultado ideal em relação aos custos, e por fim, a adução submarina se apresenta como uma prática associada na gestão do abastecimento de água em áreas metropolitanas e semiáridas.

Os autores Amaral; Cirilo e Ribeiro Neto (2020), desenvolveram um modelo multicritério de decisão baseado em um SIG, que determinou, a partir de simulações, rotas de custo mínimo para o traçado de adutoras, levando em consideração os critérios de distância entre rios, áreas alagadas e a proximidade de rodovias, por meio de ponderações obtidas através de especialistas. Os autores utilizaram o método da AHP. A ferramenta utilizada para a álgebra de mapas, se deu através do conjunto de ferramentas do *Spatial Analyst* (ArcGIS). A área de estudo foi um trecho da Adutora do Pajeú, localizada em Pernambuco, cuja base de dados foi oriunda do PE3D e os dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)/TOPODATA. Os autores concluem que a metodologia proposta pode ser utilizada no desenvolvimento de projetos, dada a disponibilidade de dados e informações. Outro ponto a ser levado em consideração pelos autores é o uso de outros critérios para a tomada de decisão, como exemplo, o tipo de solo e o melhoramento do critério que representa o consumo de energia através do processo de bombeamento. Os critérios e restrições a serem avaliados para o traçado de adutoras serão baseados nas recomendações de projetos e disponibilidade de informações: declividade, distância dos principais rios e áreas alagadas, distâncias de estradas e altitude.

Cruz-Chávez *et al.* (2020) desenvolveram um método baseado no algoritmo em *Simulated Annealing* (SA), denominado de abordagem de busca pseudoaleatória guiada para gerar caminhos alternativos, para resolver o problema de planejamento de corredor. A abordagem adotada pelos autores também tem contribuições para aplicações de adutoras. O código foi desenvolvido em linguagem C++. Os autores fazem comparações com três exemplos que utilizaram o algoritmo ganancioso, e constataram que os resultados do algoritmo proposto, superam em mais de 18%. Os autores fazem a recomendação para trabalhos futuros, o desenvolvimento de um método que ajuste as curvas da zona de impacto (faixa) do corredor para estreitar a busca. Assim melhorando a solução inicial.

Os pesquisadores Simon, Japheth e Mohammed (2021) conduziram um estudo abordando a construção de uma adutora, com o propósito de selecionar a rota mais eficiente para conectar a estação de água de Yola à estação de Yolde Pate. As coordenadas dos pontos foram adquiridas por meio de dispositivos GPS e, posteriormente, foram digitalizadas e sobrepostas ao mapa da rede viária, resultando na produção do mapa do estudo, que foi então integrado ao *software* ArcGIS 10.4. Além disso, o estudo buscou reavaliar as instalações de distribuição de água na área de estudo. Utilizando a extensão *Network Analyst*, os autores identificaram a melhor rota, abrangendo uma distância de 5.939 metros. Os resultados da pesquisa indicam que essa ferramenta desempenha um papel significativo no processo de tomada de decisão pela administração do conselho de água.

Jain *et al.* (2021) buscaram determinar a rota ótima entre os Distritos de Hanumangarh e Jhunjhunu, ambos situados na Índia. Para atingir tal objetivo, os pesquisadores empregaram a construção de superfícies de custo e a realização de cálculos e classificações não supervisionadas da distância euclidiana em relação a todos os fatores relevantes, utilizando a ferramenta ArcGIS Network Analyst. As conclusões obtidas por esses autores destacam que, embora a otimização baseada em pixels tenha resultado em tempos de computação mais longos, essa metodologia se mostra particularmente eficaz quando direcionada a projetos voltados para a ecologia e a sustentabilidade.

Sarmiento (2022a) propõe um algoritmo de determinação automática de rotas ótimas, denominado “Busca pelo Ajuste Geométrico da Despesa Anual” – BAGDA. Conforme resume o autor, trata-se de “um algoritmo capaz de calcular a rota ótima para adutoras que atravessam terrenos com ou sem restrições de deslocamento adicionais às diferenças de cota e às perdas de carga a serem vencidas por bombeamento. O critério empregado, tanto na definição do diâmetro da adutora, como no cálculo das rotas viáveis é o da minimização da despesa anual, resultante da soma dos (i) custos anualizados referentes à aquisição da tubulação com os (ii) custos de pagamento pela energia elétrica para funcionamento do sistema ao longo de sua vida útil. A geometria das rotas mais curtas no espaço multidimensional de busca é calculada pelo algoritmo proposto, obtendo-se assim, a combinação ótima entre comprimento e altura manométrica da adutora. Objetivando demonstrar a adequabilidade do algoritmo proposto, o autor apresenta quatro diferentes cenários de adução pressurizada, contextualizados em áreas topográficas obtidas de imagens SRTM, com cotas intepoladas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a cada 30m. O recorte topográfico utilizado, coincide com a área de implantação da captação e início

de adução do Eixto Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF). O algoritmo porposto, leva em consideração a despesa anual referente aos custos de implantação, sendo composta pelo (i) custo de aquisição da tubulação e (ii) o custo da eletricidade ao longo da vida útil do empreendimento.

O algoritmo proposto visa determinar a combinação ótima entre o comprimento da adutora e sua altura manométrica. O espaço de busca compõe-se das dimensões representativas do custo anualizado com tubulação e do custo com a energia elétrica (Sarmiento, 2022a). O autor afirma que, em se tratando de áreas que exibam dificuldades para a implantação da linha adutora, tais como zonas pantanosas, inundadas, de proteção ambiental, com infraestrutura interferente, etc., os custos de travessia são evidentemente diferentes e devem ser avaliados e incorporados ao custo de deslocamento. Da mesma forma, em se tratando de travessia de áreas em que as declividades naturais apresentem-se acima do limite normativo, ou do recomendado pelo fabricante dos tubos, podem ser restringidas, ou seja, excluídas do domínio de busca do algoritmo (Sarmiento, 2022a). Adicionalmente à serventia ao traçado automático ótimo, a metodologia de cálculo dos custos também é empregada pelo autor para determinar previamente o diâmetro mais econômico para a linha adutora, dados os parâmetros influenciadores, tais como: custo de tubulação, energia elétrica, taxa de juros, vida útil do projeto, etc.

Na concepção do algoritmo BAGDA, o autor cria um coeficiente (incorporado à função de penalização proposta, cerne da metodologia) denominado Coeficiente de Sinuosidade (CS), cuja função é estabelecer um peso virtual do desnível topográfico entre células adjacentes do percurso para o cômputo do valor da penalização econômica, ao se adotar o deslocamento em cada direção possível. Esse valor de sinuosidade varia entre $-3 \leq CS \leq +3$. Na dinâmica peculiar do algoritmo, a busca no domínio dos custos é realizada, conjugando-se o coeficiente de sinuosidade com a sistemática adoção de zonas de exclusão entre os pontos de captação e de entrega da água. Conforme o autor, as zonas de exclusão são aquelas através das quais não é permitida a passagem da adutora. Assim, para cada zona de exclusão, o coeficiente de sinuosidade irá variar no intervalo especificado pelo projetista, gerando assim, diversas combinações e correspondentes rotas, cada uma delas com seus respectivos custos econômicos.

O autor também codificou o algoritmo em linguagem de programação Visual Basic do Visual Studio, dotando o software de *interface* amigável, onde é possível a inserção de parâmetros prévios para o desenvolvimento dos cálculos.

Na primeira aplicação contida em Sarmiento (2022a), o programa desenvolvido pelo autor, apresenta como valor ótimo, um coeficiente de sinuosidade CS igual a $-0,4$. A rota assim obtida, corresponde a um custo anual de R\$ 883.782,60 (45,3% do custo com a tubulação e 54,7% de custo da energia elétrica) e o comprimento da adutora 7.652,72 m.

Ainda no artigo supracitado, para as demais aplicações, o autor apresenta os respectivos CS e zonas de exclusão implicantes nos respectivos traçados ótimos e conclui que o algoritmo BAGDA é uma rápida alternativa automatizada para a determinação de traçados ótimos de sistemas adutores e que o fato do algoritmo funcionar para ambientes multidimensionais em termos de custos financeiros, oferece soluções que envolvem as fases de implementação (aquisição das tubulações) e a fase de operação (custos anuais de eletricidade) e que representam a realidade dos projetos em termo de diâmetro da adutora e o traçado ótimo. O autor também afirma que o algoritmo BAGDA, pode utilizar outros critérios de otimalidade, e que, para o estudo realizado (critério de minimização do custo) se apresenta como uma boa opção enquanto ferramenta de projeto, à medida em que elimina a subjetividade intrínseca às metodologias que vêm frequentemente sendo empregadas, baseadas em SIG.

É percebido que após as análises e os estudos dos artigos que tratam da temática da qualificação, é possível notar que houve várias formas de se estabelecer o traçado de adutoras, desde a concepção por meio de especialistas, demonstrados por Hardin; Bridges e Rundell (2008) até a utilização da combinação entre *softwares* comerciais/livres, com a elaboração de um SIG e o uso de *plugins* para a escolha do melhor traçado (Luettinger e Clark, 2005; Salah e Atwood, 2011; Mohammed e Majid, 2014; Suleiman *et al.*, 2015; Kathuo e Mubea, 2016; Arabi e Ghareh Hassanloo, 2018; Amaral; Cirilo e Ribeiro Neto, 2020; Jain *et al.*, 2021; Simon; Japheth e Mohammed, 2021). Sarmiento (2012; 2022) utiliza heurísticas para encontrar os possíveis caminhos ótimos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos trabalhos pesquisados, foi possível conhecer as principais ferramentas e artifícios para se achar o caminho ótimo para a elaboração do traçado de Adutoras. Para a elaboração do algoritmo, foi escolhida a linguagem de programação *Python*, pois segundo Manzano (2018), é considerada de alto nível interpretativa, o que significa que seus programas são escritos em *scripts* e são executados dentro de um ambiente operacional, sem a necessidade de ser compilado. A linguagem é orientada a objetos e dada a facilidade de escrita simples, aceita programação nos estilos do paradigma de programação estruturada e funcional.

A plataforma utilizada para a escrita do código foi o *Jupyter Notebooks*, que é uma plataforma de licença livre, que permite a programação em códigos através de diferentes linguagens e serve de suporte para os trabalhos científicos acadêmicos (Kluyver *et al.*, 2016). Esta permitiu realizar operações matemáticas, plotagem de gráficos, etc. O código desenvolvido foi organizado através de células, onde é possível realizar modificações individuais e realizar a verificação das “saídas” computacionais. Outra funcionalidade dos Notebooks, diz respeito ao acesso que pode ser realizada através de navegadores (*Internet Explorer*, *Google Chrome* e etc.) ou através de um servidor remoto.

3.1 Escolha do método e da função objetivo

Para a elaboração da função objetivo, foram pesquisados modelos já desenvolvidos por outros autores e o método selecionado foi o método heurístico, de apoio a busca ótima, proposto por Sarmiento (2022a) que teve como base o Algoritmo A*. Conforme resume o autor do algoritmo BAGDA, trata-se de:

“um algoritmo capaz de calcular a rota ótima para adutoras que atravessam terrenos com ou sem restrições de deslocamento adicionais às diferenças de cota, e às perdas de carga a serem vencidas por bombeamento. O critério empregado, tanto na definição do diâmetro da adutora, como no cálculo das rotas viáveis é o da minimização da despesa anual, resultante da soma de: (i) custos anualizados referentes à aquisição da tubulação; (ii) custos de pagamento pela energia elétrica para funcionamento do sistema ao longo de sua vida útil. A geometria das rotas mais curtas no espaço multidimensional de busca é calculada pelo BAGDA, obtendo-se assim a combinação ótima entre comprimento e altura manométrica da adutora”.

3.2 Equações para o cálculo do custo do algoritmo proposto

Conforme afirmado, o espaço de busca onde o algoritmo MAPR irá operar, o mesmo introduzido pelo algoritmo BAGDA, proposto por Sarmiento (2022a). A despesa anual total

com a implantação e operação do sistema adutor é bem representada pelos custos anualizados decorrentes da aquisição de tubos e a despesa anual com o pagamento da energia elétrica, respectivamente. Assim, a despesa anual total DA_{total} será o produto do comprimento total da tubulação (L), pela Despesa Anual Unitária com a aquisição de tubos, DAU_t , acrescido da despesa operacional que engloba os custos energéticos para vencer as perdas de carga e o desnível geométrico. Portanto, ainda conforme Sarmento (2022a), a Despesa Anual Unitária com Energia DAU_e , incidirá sobre: o produto da perda de carga unitária (J_u) pelo comprimento (L) e sobre o desnível geométrico máximo (H_g) encontrado no trajeto:

$$DA_{total} = DAU_t \times L + DAU_e \times J_u \times L + DAU_e \times H_g \quad (5)$$

O preço a ser pago pelos tubos que comporão a linha adutora é função linear do seu diâmetro comercial (D). Por sua vez, o peso por metro linear dos tubos pode ser descrito como uma função quadrática do diâmetro comercial (em parênteses), como demonstrado em Sarmento (2022a), por meio da Equação 6:

$$DAU_t = K_t (A_0 + A_1 \times D + A_2 \times D^2) \quad (6)$$

O componente anualizado (K_t) é descrito como equivalente proporcional ao coeficiente C_1 , entre o peso e preço unitário da tubulação (R\$/Kg). Onde o j representa a taxa de juros de interesse e T sendo o tempo de diluição do investimento com a aquisição dos tubos. O tempo de diluição utilizado foi de $T = 50$ anos, baseado na aplicação 1 de Sarmento (2022a) (Equação 7):

$$K_t = C_1 \times j \times \frac{(1+j)^T}{((1+j)^T - 1)} \quad (7)$$

A Despesa Anual por Unidade de Eletricidade (DAU_e) pode ser obtida usando a Equação 7, que é derivada da equação de perda de carga de Hazen-Williams, e da fórmula clássica de potência elétrica. A variável η representa o desempenho do conjunto moto bomba. Os exemplos de aplicação apresentados em Sarmento (2022a) utilizaram rendimento de 85%, vazão (Q) de $0,351 \text{ m}^3/\text{s}$, coeficiente de rugosidade Hazen-Williams (C) de 140 e diâmetro comercial (D) de 600 mm.

$$DAU_e = 104.272 \times C_2 \times \frac{Q^{2.85}}{\eta \times C^{1.85} \times D^{4.87}} \quad (8)$$

O (C_2) é o denominado coeficiente de proporcionalidade, produto entre a quantidade de horas de funcionamento diário do sistema de bombeamento ao longo de um ano (n) pelo valor da tarifa de consumo elétrico ($E_{consumption}$), (Equação 9). O valor da tarifa adotado para as aplicações realizadas foi de 0,31 R\$/kWh, para um período de 50 anos.

$$C_2 = n \times E_{consumption} \quad (9)$$

3.3 Proposição do algoritmo MAPR

A equação proposta pelo MAPR, introduz o coeficiente *Destiny Way* (DW), que busca ponderar a importância dos deslocamentos na direção do destino em detrimento dos custos obtidos com o cálculo de $g(n)$. Ou seja:

$$f(n) = g(n) + h(n) \times DW \quad (10)$$

Com $g(n) = DA_{total}$ sendo calculado do ponto de captação até a célula N . E conforme a Equação 11, o $h(n)$ como sendo a soma do produto entre a distância Euclidiana entre a célula atual até a final $|NB|$ e DAU_t com o produto entre $|NB|$, o coeficiente de perda de carga h_f e a DAU_e .

$$h(n) = |NB| \times DAU_t + |NB| \times h_f \times DAU_e \quad (11)$$

3.4 Dinâmica do algoritmo

O algoritmo proposto estabelece rotas entre o ponto de captação e de entrega da água, tendo como sistemática de deslocamento aquela regente do algoritmo A^* . A busca A^* combina uma função de custo, que afere o custo de deslocamento entre células, com uma função heurística, que “sabe” onde o objetivo ou célula destino se encontra e, a cada deslocamento, produz estimativas de custo que ajudam a direcionar a progressão do movimento para se chegar ao caminho mais curto de maneira mais rápida. Além da subjacência da sistemática de deslocamento do algoritmo A^* , o algoritmo proposto aduz do algoritmo BAGDA, o equacionamento dos custos de adução anualizados.

Apesar dessas semelhanças, as funções de decisão acerca da direção de cada deslocamento de uma célula mãe para uma célula filha (adjacente), ocorre de maneira diferenciada em um e outro algoritmos. No algoritmo BAGDA, emprega-se uma função de penalização em lugar da função $g(n)$, sendo nela ponderada a influência do desnível geométrico, em face aos (i) custos de aquisição de tubos e (ii) perda de energia por atrito na adutora. O fator de ponderação introduzido pelo algoritmo BAGDA é denominado Coeficiente de Sinuosidade (CS), e sua calibração ocorre conjuntamente com a adoção sistemática de zonas de exclusão, delimitadas por curvas de nível acima das quais não é permitido o deslocamento.

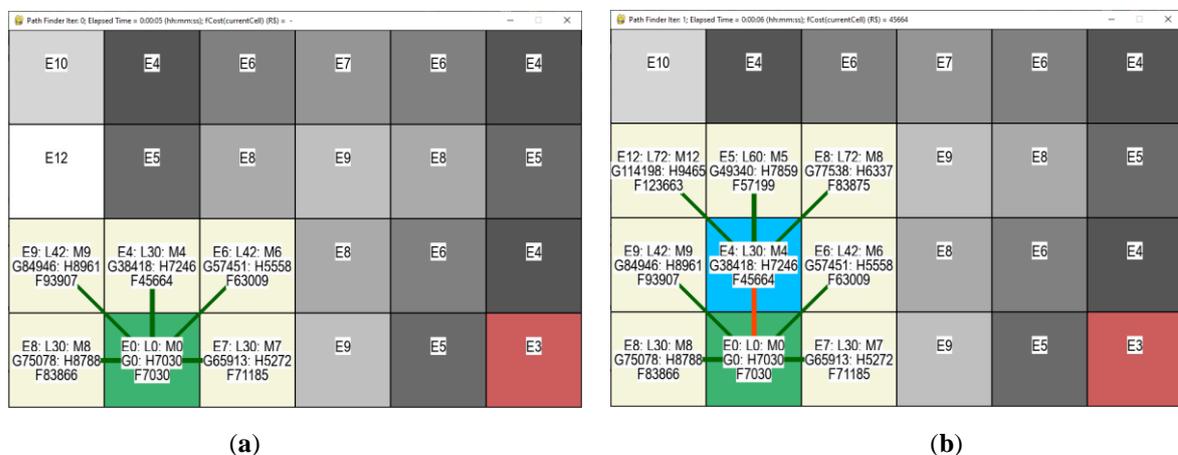
No algoritmo MAPR, há também um fator de ponderação, mas este é aplicado sobre a função $h(n)$, ou seja, sobre a parcela heurística do algoritmo A*. Geralmente esse fator de ponderação não é empregado, mas sim igualado à unidade. É visto adiante, no entanto, que o emprego desse coeficiente prova ser capaz de produzir soluções alternativas tão boas quanto aquelas encontradas com o coeficiente, sendo igual a um.

A depender do problema, o algoritmo proposto pode também lançar mão do conceito de Zona de Exclusão introduzido pelo algoritmo BAGDA, para com isso permitir que os deslocamentos ocorram somente até a cota com elevação suficiente para que a água possa alcançar o seu destino.

As outras diferenças entre os dois algoritmos são no modo de cálculo das variáveis H_g e $h(n)$. O desnível geométrico H_g no MAPR é a altura relativa máxima vencida ao longo do trajeto que leve da célula inicial, A, até a célula atual, N. Assim, só valores positivos de H_g , superiores ao H_g já vencido, são contabilizados ao atualizar a vizinhança da célula atual. O algoritmo BAGDA do outro lado, considere H_g como sendo igual à diferença de cotas entre a célula atual e a célula filha, permitindo assim, valores negativos para H_g . Com relação ao cálculo da função heurística $h(n)$, o algoritmo BAGDA contabiliza apenas o custo da tubulação, enquanto o MAPR considere ambas as parcelas de custo que variam linearmente com o comprimento da tubulação, as quais são: o custo da tubulação e o custo de energia, necessária para vencer as perdas de carga por atrito ao longo do tubo. Sendo assim, $h(n)$ é ligeiramente maior no MAPR do que no BAGDA. Lembrando que essa diferença pode ser acentuada ou atenuada com uma escolha apropriada do coeficiente de ponderação DW , pois há outros fatores que são levados em consideração como: ambientais, zonas geotécnicas e etc.

Durante cada iteração do algoritmo, uma célula é selecionada e sua vizinhança é atualizada. Os valores adotados para os testes, foram extraídos do trabalho de Sarmento (2022a). Para cada célula, são armazenados valores da elevação (E), comprimento de tubo (L), altura geométrica (M), custo do tubo e de energia necessário para transportar água da célula A até a célula em questão (G), custo de transporte da célula em questão até a célula final (H) e a função objetivo (F). A função objetivo (F) é calculada por meio da Equação 8, onde DW é um coeficiente de peso que pode ser ajustado para controlar a importância relativa do custo do caminho em relação à distância estimada para o objetivo. A Figura 6a) mostra os resultados da primeira iteração de um problema teste com discretização uniforme de 6 colunas e 4 linhas, e uma distribuição hipotética de elevação. Para percorrer uma célula na horizontal ou vertical, são necessários 30 metros de tubo e nas diagonais são necessários aproximadamente 42 metros de tubo. Dessa forma, segue a Figura 7:

Figura 7 - Exemplo hipotético utilizado para a validação do algoritmo.



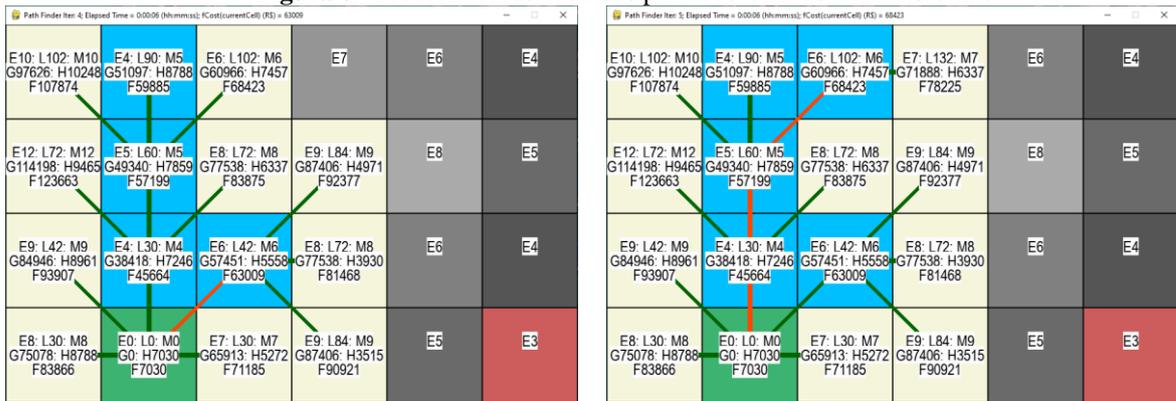
Fonte: O autor (2023).

A célula inicial é destacada em verde (quarta linha e segunda coluna), enquanto a célula final é marcada em vermelho (quarta linha, sexta coluna). Na primeira iteração, o algoritmo calcula os valores das células vizinhas da célula inicial, a fim de selecionar aquela com o menor custo F para a próxima iteração. Nesse caso, a célula escolhida é aquela localizada na segunda coluna e terceira linha, identificada como $N = [2, 3]$, que apresenta um custo F de 45.664 reais/ano.

Na segunda iteração do algoritmo, a célula atual é destacada em azul e a sua vizinhança é atualizada, conforme mostrado na Figura 9b. Assim sendo, a célula selecionada para a seguinte iteração é $N = [2, 2]$.

Pode acontecer que uma célula seja atualizada duas ou mais vezes, nesse caso a sua célula mãe torna-se a última célula que a atualizou. Nesse caso, a linha verde, que nas figuras está mostrando a relação de parentesco mãe-filha, será apagada e outra linha será traçada, mostrando a nova relação mãe-filha. Isso acontece quando é identificado um caminho melhor para se chegar à célula filha, ou seja, com um custo F menor. Como é o caso da célula [4, 4] onde foram registrados dois custos para alcançá-la, R\$ 90.921 e R\$ 89.515 reais/ano, ver as Figuras 8b, e a 9a que segue abaixo:

Figura 8 - Procedimentos adotados para a escolha do caminho ótimo.

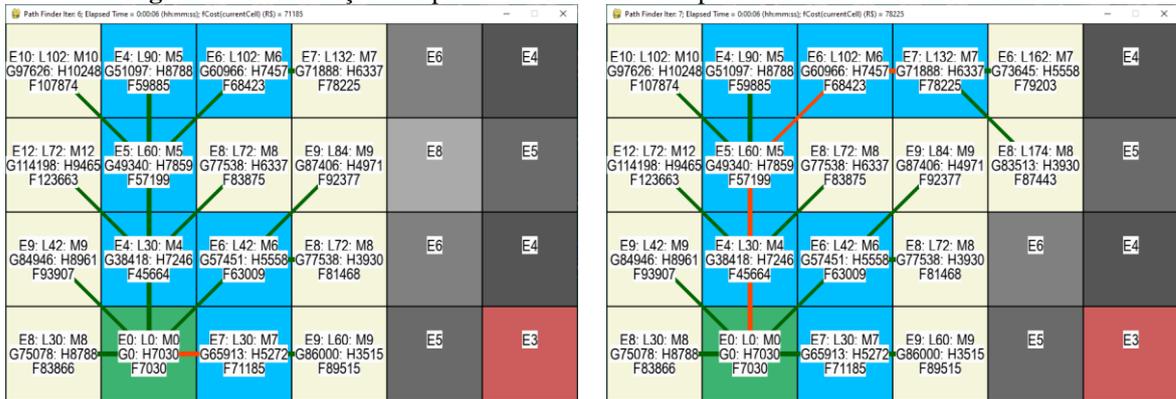


(a)

(b)

Fonte: O autor (2023).

Figura 9 - Continuação dos procedimentos adotados para a escolha do caminho ótimo.



(a)

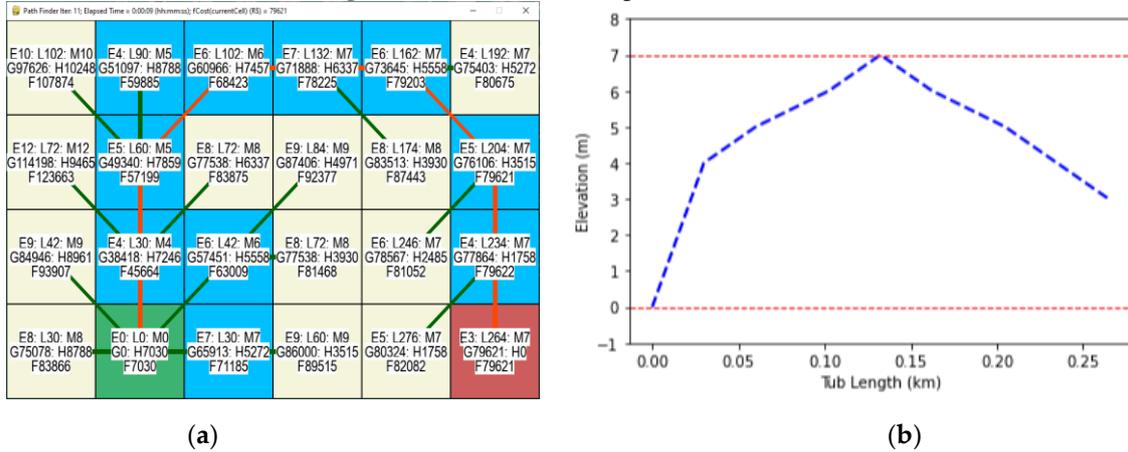
(b)

Fonte: O autor (2023).

Os resultados dessa simulação são representados na Figura 10, onde a linha laranja, que nas figuras está conectando a célula atual N, com a célula inicial A pela relação de parentesco mãe-filha, está retrazando o melhor caminho encontrado de se chegar de A até B. A figura 11b mostra o perfil de elevação ao longo desse caminho. Nesse caso, tendo escolhido o parâmetro DW igual a 1, obteve-se um custo total de R\$ 79.621 reais/ano, e uma altura

geométrica relativa máxima de 7 metros ao longo do caminho identificado. Segue abaixo, a Figura 10:

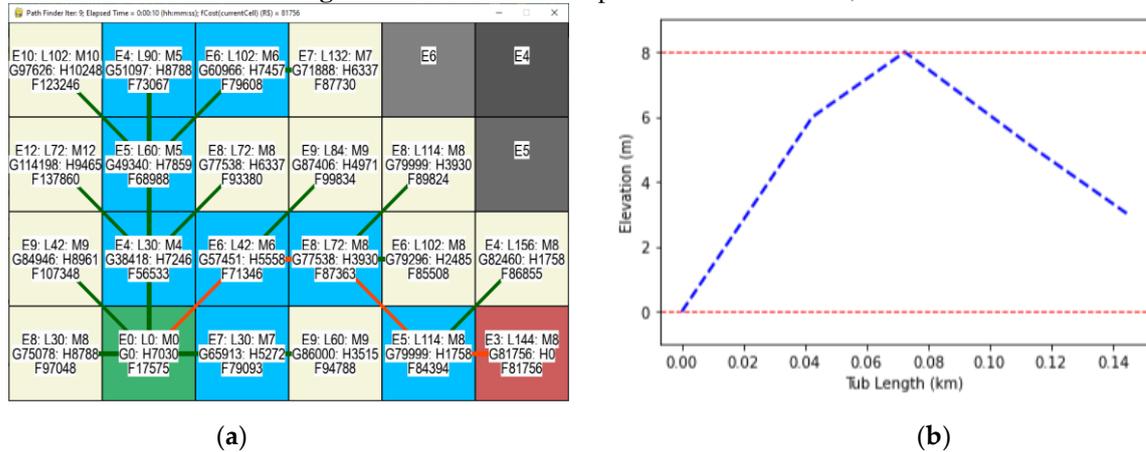
Figura 10 - Resultado final para o valor de $DW = 1,0$



Fonte: O autor (2023).

A Figura 11 a seguir, mostra os resultados obtidos, com um DW igual a 2,5. Nesse caso, obteve-se um caminho bem mais curto, porém, com um custo ligeiramente maior, devido à necessidade de atingir uma altura geométrica maior de 8 metros e, conseqüentemente, um custo de energia mais elevado:

Figura 11 - Resultado final para o valor de $DW = 2,5$



Fonte: O autor (2023).

3.5 Sistema de Informação Geográfico

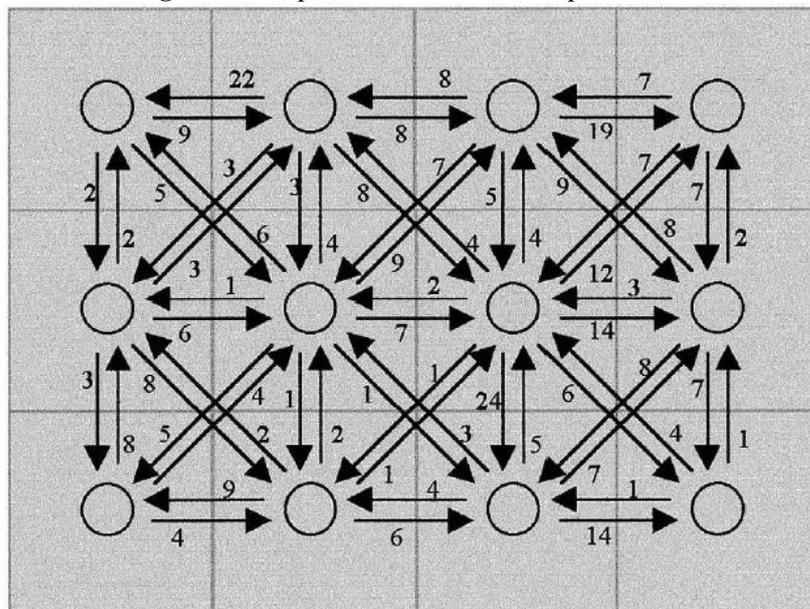
O *software* escolhido para auxiliar na preparação das imagens foi o QGIS na versão 3.32, pois permite a criação de várias camadas com o uso de projeções a partir de *raster/vetoriais*, além de sua licença de utilização ser livre, o que permite a modificação para executar diferentes tarefas. A imagem utilizada para a validação do algoritmo será através do

TOPODATA (SRTM), de 30 m. A escolha se deu pelo fato de posteriormente ser feita a análise, utilizando a coleção de imagens do PE3D (PE3D, 2016).

3.6 Pré-processamento da imagem

Para realizar o estudo da área, de forma que o algoritmo fosse reconhecido, foi elaborado um GRID da imagem, conforme utilizado por Tang *et al.* (2021). A biblioteca utilizada para a elaboração do GRID foi através do *Numpy* da linguagem *Python*. Esse GRID gerado possui uma característica de permitir com que cada valor da célula assuma um valor da cota topográfica, como apontam Collischonn e Pilar (2000), nesse tipo de problema, os custos são variáveis, os quais estão sobre a superfície e dependem da direção tomada, sem uma direção predominante, o que os caracterizam como o custo de passagem anisotrópico. A Figura 12 a seguir, demonstra os possíveis valores, onde os custos de passagem dependem da localização e da direção:

Figura 12 - Superfície de custo anisotrópica.



Fonte: Collischonn e Pilar (2000).

Para que a imagem fosse reconhecida pelo algoritmo A*, e posteriormente fossem realizados os procedimentos para o caminho ótimo, foi adotada a biblioteca *numpy* da linguagem *Python*, a qual permitiu essa transformação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

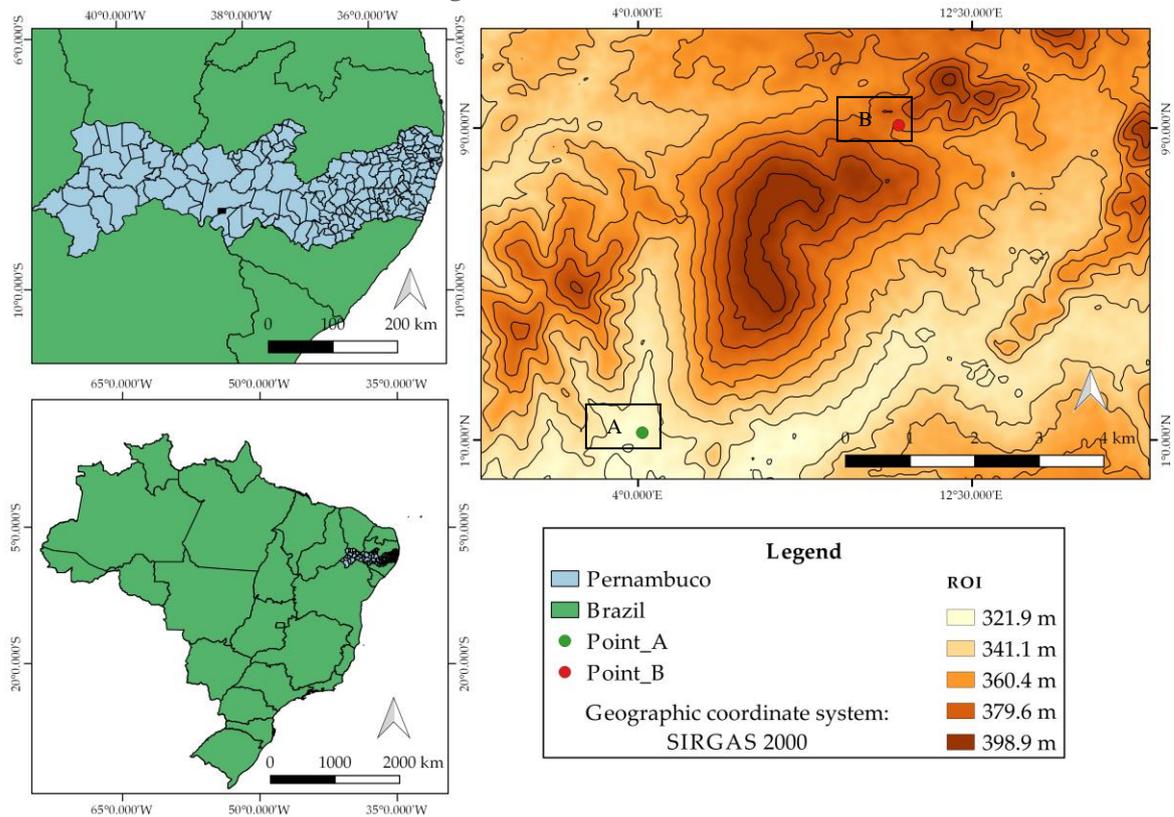
Os tópicos a seguir, explicarão os exemplos utilizados para validar o algoritmo proposto, bem como os casos reais de aplicação.

4.1 Exemplo utilizado para a validação do algoritmo

Para a validação do algoritmo, foi escolhida a região topográfica (SRTM) que cobre uma parte da Adutora do Eixo Leste do PISF, adotada originalmente por Sarmiento (2022a). Devido à sensibilidade dos algoritmos, à malha topográfica e ao método de cálculo utilizado, não é apropriado comparar as soluções geradas por eles. Cada algoritmo produz soluções ótimas defensáveis do ponto de vista da elaboração do traçado de adutoras. A região está localizada na área de Pernambuco (Brasil), cujo canto superior esquerdo está localizado na latitude $8,70^\circ$ e longitude $38,38^\circ$. O ponto de captação está localizado nas coordenadas: $8,7676^\circ$ latitude e $38,341^\circ$ longitude, com elevação de 322 m, e o ponto de entrega $8,7234^\circ$ latitude e $38,304^\circ$ longitude, com elevação de 370 m. Cada *pixel* da imagem corresponde a uma janela de 30 m x 30 m (valor do SRTM).

A Figura 13 a seguir, demonstra a área de interesse, cujo ponto em verde (ponto A) representa o de captação e o vermelho (ponto B) o de entrega:

Figura 13 - Área de interesse.

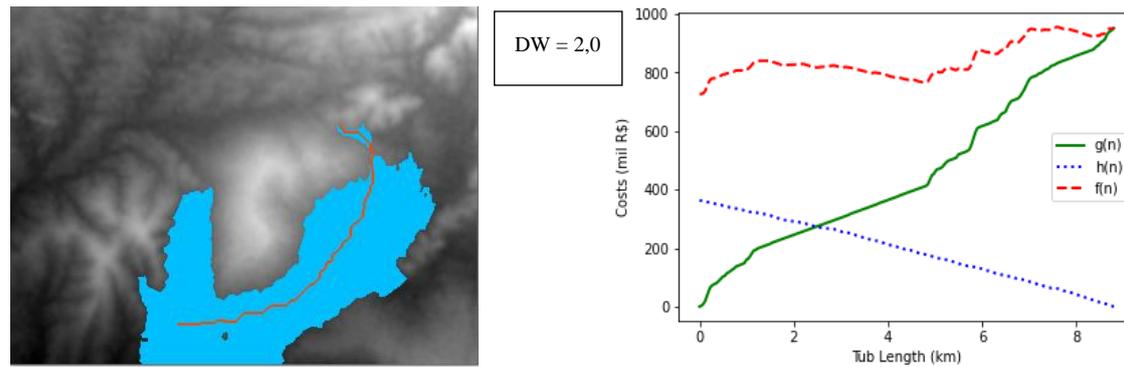
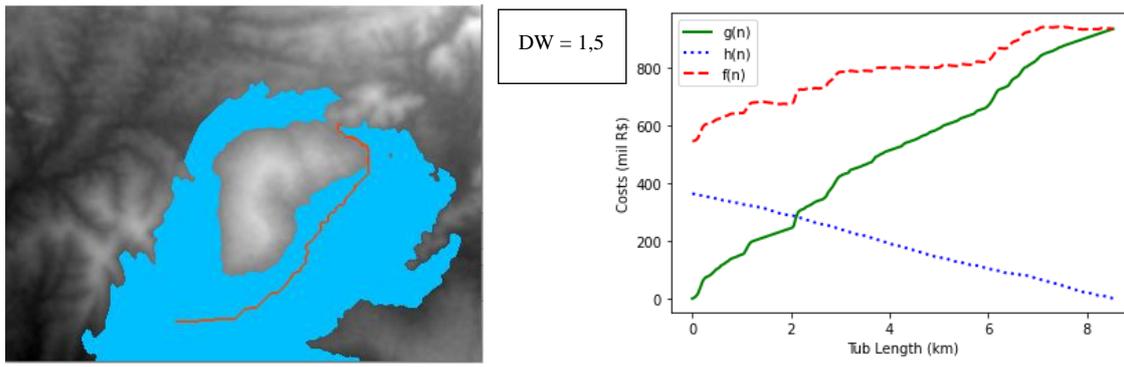
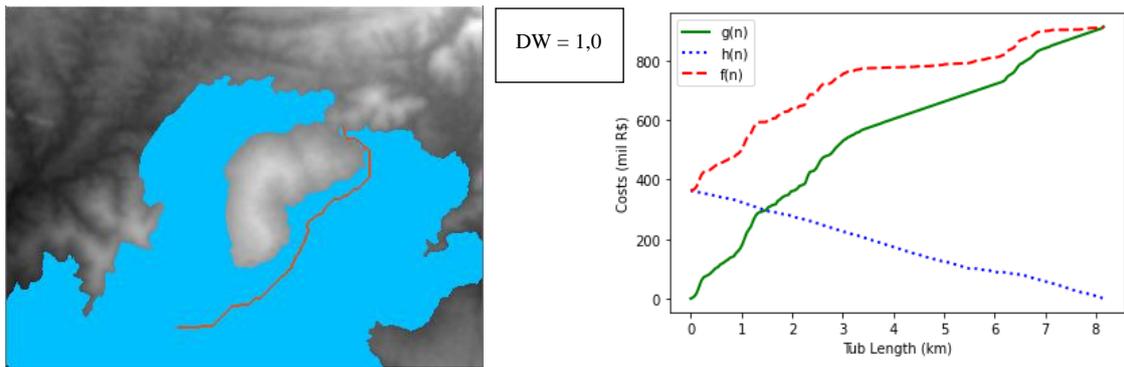
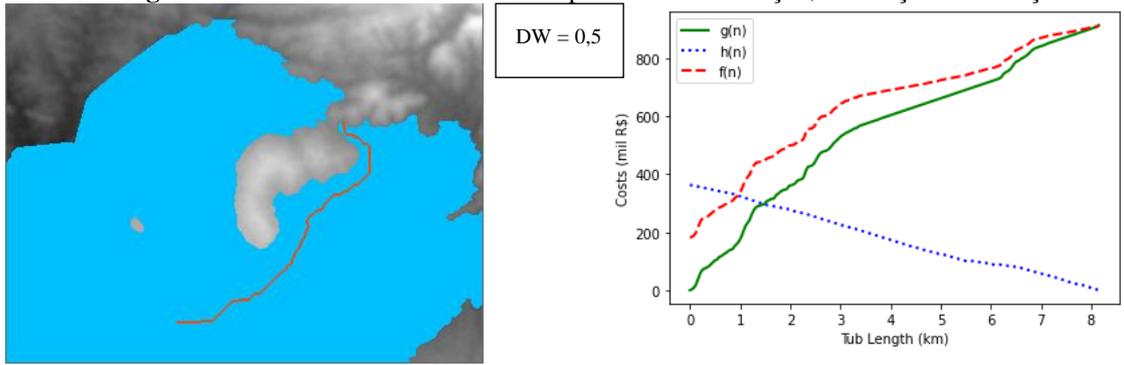


Fonte: O autor (2023).

Após a preparação da imagem, foi escolhida uma faixa de valores de 0,5 a 2,5 para DW , onde foi aplicado o algoritmo MAPR. Posteriormente, foram realizadas simulações para diferentes valores de DW , e o rastreamento ideal foi identificado e apresentado na Figura 13. O traçado ótimo é descrito na cor laranja, enquanto as células que foram visitadas estão sinalizadas em azul. Por meio das imagens, é percebido que quanto menor o valor associado ao DW , mais células são utilizadas para a busca da solução. Quanto maior o valor de DW , consecutivamente, o algoritmo busca um caminho mais curto, fazendo com que o custo de energia seja ampliado. Esse aumento é percebido por meio das Figuras 13b, 13d, 13f, 13h e 13j. A Tabela 1, aponta os valores do tempo total das simulações, despesa anual total e respectivas percentagens de contribuição do custo de energia e da aquisição dos tubos.

A seguir, será apresentada uma sequência de figuras (14a até figura 14j):

Figura 14 - Resultados analíticos do comprimento da tubulação, em função da elevação.



(a)

(b)

(c)

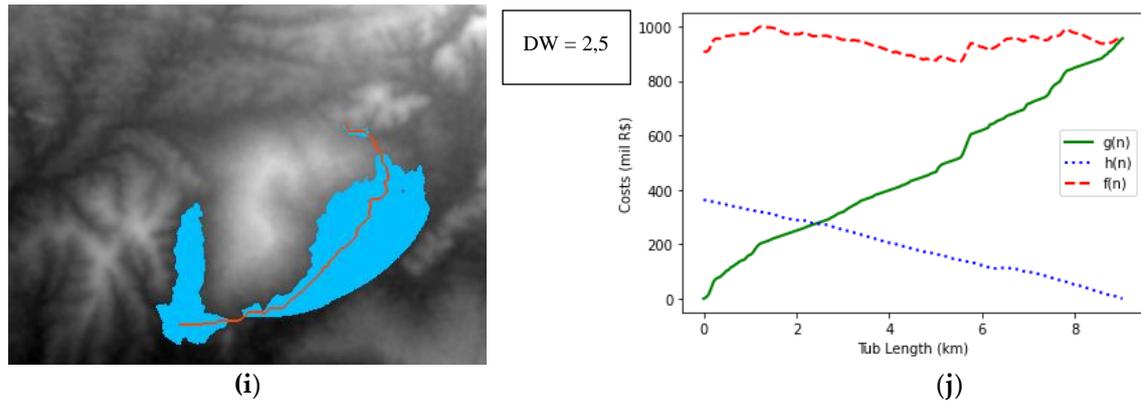
(d)

(e)

(f)

(g)

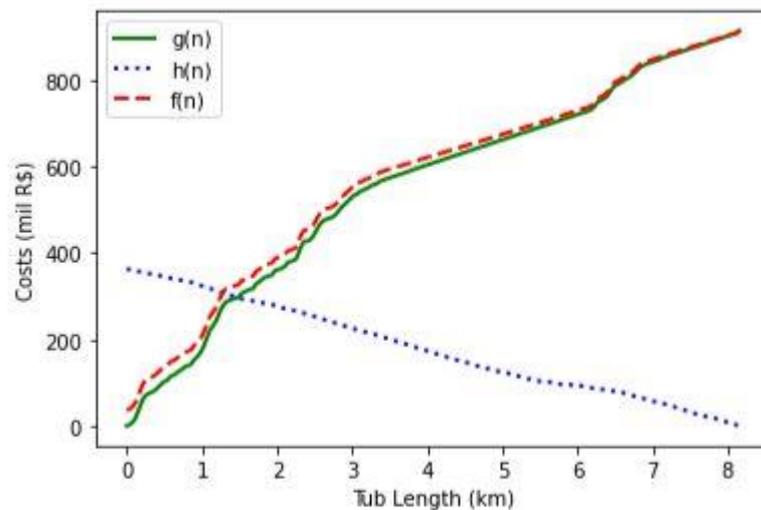
(h)



Fonte: O autor (2023).

A primeira simulação foi realizada com o parâmetro $DW = 0,5$, onde foi percebido um maior tempo de processamento, pois o campo de busca foi o maior identificado nas simulações. Valores menores para $DW \leq 0,5$, resultaram em custos constantes a R\$ 914,03 mil. A Figura 15 abaixo, resulta na escolha do $DW = 0,1$. É percebido que quanto menores forem os valores adotados, mais a função $g(n)$ aproxima-se da função $f(n)$, considerando muito pouco a parcela de $h(n)$. Veja-se na figura supramencionada:

Figura 15 - Teste com o $DW = 0,1$.



Fonte: O autor (2023).

Na Figura 14b), a linha em vermelho representa os valores da função objetivo, cuja soma das parcelas de $g(n)$ e $h(n)$, definem o custo total. O valor de $h(n)$ decresce ao se aproximar da célula de destino, célula B, enquanto há o aumento do custo acumulado $g(n)$; 14c) a segunda simulação $DW = 1,0$ implicou em um menor espaço de busca, e consecutivamente um menor tempo de processamento (critério importante para simulações

computacionais), contudo, o valor da $f(n) = 914.03$, se manteve igual ao resultado anterior; 14d) nessa situação o valor de $f(n)$ é considerado o menor.

A seguir, será apresentada a Tabela 2 com o resumo dos resultados da primeira aplicação:

Tabela 2 - Análise dos resultados da primeira aplicação

DW	Altura Manométrica (mca)	Tempo de processamento (hh:mm:ss)	Tamanho da tubulação (m)	Custo total (mil R\$)	Custo da energia elétrica (%)	Custo da tubulação (%)
0,5	53,54	0:26:31	8.152	914,03	53,53	46,47
1,0	53,54	0:12:11	8.152	914,03	53,53	46,47
1,5	53,80	0:05:45	8.533	939,02	52,51	47,49
2,0	53,99	0:02:29	8.801	954,71	51,83	48,17
2,5	54,14	0:01:01	9.024	967,82	51,27	48,73

Fonte: O autor (2023).

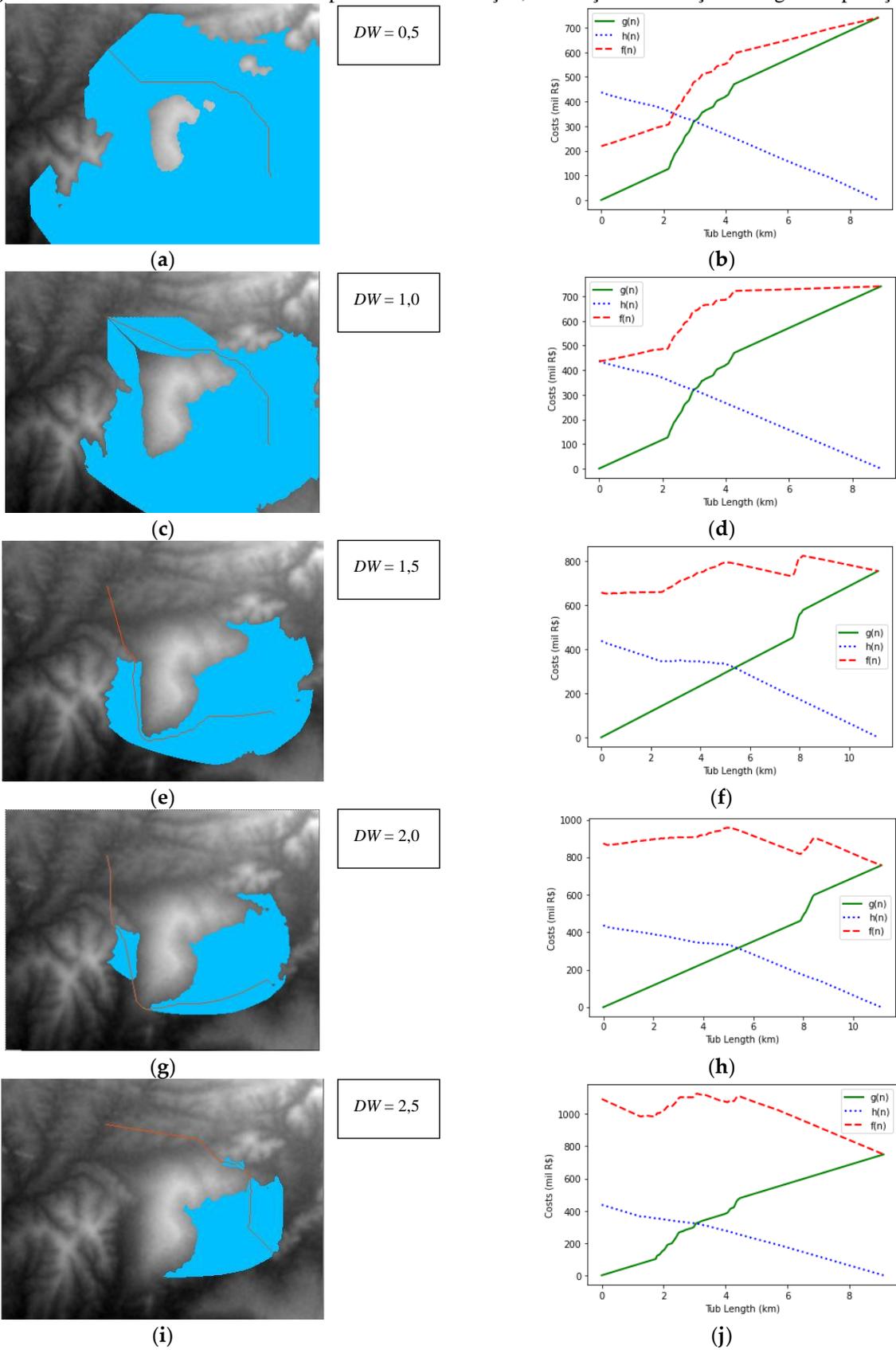
Para os diferentes valores de $0,5 \leq DW \leq 2,5$; o resultado que apresentou o menor custo total foi o de $DW = 1,0$, com um comprimento total de 8.152 m, e tempo de processamento de 12 minutos e 11 segundos. Conforme se observa na Tabela 1, à medida que o coeficiente DW aumenta, também aumenta o comprimento da rota calculada e, com isso, a despesa anual total, pois a redução da altura manométrica assim auferida, não compensa o incremento de custos devidos à despesa anualizada referente à aquisição de tubos. Os dois primeiros valores admitidos para DW implicam na mesma trajetória, o que significa que a redução do espaço de busca formado pelas células visitadas pelo algoritmo quando DW , passa de 0,5 para 1,0, e não constitui uma variação suficiente para impor a tendência esperada do menor custo total R\$ 914.03.

4.2 Segunda aplicação

A segunda aplicação foi igualmente extraída do trabalho de Sarmento (2022a). Trata-se do mesmo recorte topográfico, mas com a mudança nas coordenadas para o ponto de captação, agora com latitude $8,754297^\circ$, longitude $38,28989^\circ$, e altitude de 349 m e o ponto de entrega com coordenadas: latitude $8,712114^\circ$ e longitude $38,34475^\circ$. A Figura 15 ilustra os resultados para a variação entre $0.5 \leq DW \leq 2.5$. O resultado mais promissor foi quando o valor de DW apresentou-se igual a 1,0 (Tabela 2), cujo caminho está descrito na Figura 16c).

Segue a sequência de figuras (16a até 16j):

Figura 16 - Resultados analíticos do comprimento da tubulação, em função da elevação da segunda aplicação



Fonte: O autor (2023).

Conforme se vê na Tabela 3, o melhor resultado encontrado demanda a adoção de um coeficiente $DW = 1,0$, o que gera uma trajetória que tira proveito da passagem entre as duas elevações topográficas proibitivas em termos de custos energéticos. Embora preponderem custos com tubulação, a redução de custos totais medida com a escolha otimizada da rota é compensada pela redução dos custos energéticos ao longo de toda a vida útil do projeto. Tendo a aplicação resultado em um coeficiente de ponderação DW maior do que a unidade, verifica-se que a elevação de valor desse parâmetro foi decisiva para que o algoritmo dirigisse a rota ideal pelo caminho mais curto para o alcance do ponto de entrega da água, ou seja, através da garganta topográfica acima mencionada. O valor encontrado para $DW = 2,5$, mesmo apresentando os valores maiores para o custo total, sua altura manométrica é igual a 30,42 mca, aumentando a parcela do custo com a energia elétrica, em comparação com os valores de 2,0 e 1,5.

Tabela 3 - Análise dos resultados da segunda aplicação

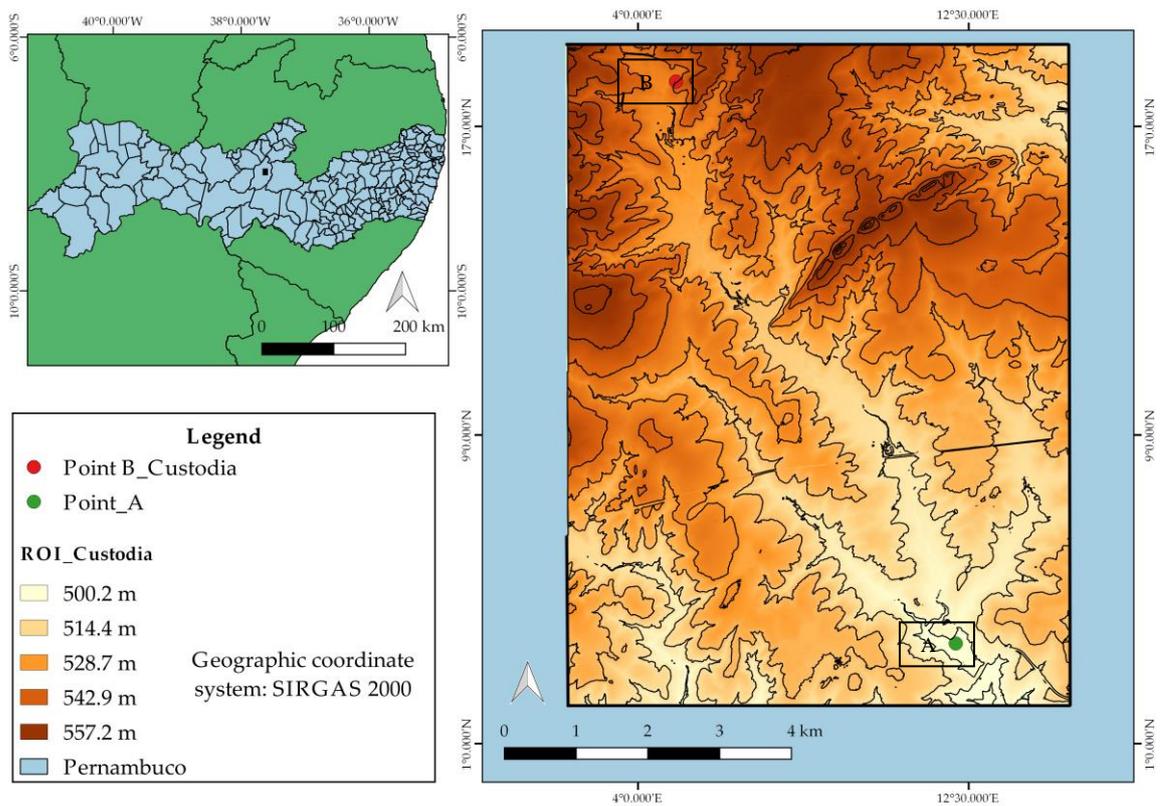
<i>DW</i>	Altura Manométrica (mca)	Tempo de processamento (hh:mm:ss)	Tamanho da tubulação (m)	Custo total (mil R\$)	Custo da energia elétrica (%)	Custo da tubulação (%)
0,5	30,29	0:21:33	8.906	742.98	37,36	62,64
1,0	30,29	0:15:08	8.906	742.98	37,36	62,64
1,5	18,79	0:05:13	11.161	755.50	22,80	77,20
2,0	19,41	0:01:32	11.129	759.52	23,43	76,57
2,5	30,42	0:00:56	9.108	754,81	36,94	63,06

Fonte: O autor (2023).

4.3 Terceira aplicação

Para a terceira aplicação, a região de interesse está localizada no estado de Pernambuco, e faz parte do projeto PISF, cujo ponto de captação utilizado tem coordenadas: 8,15922° latitude e 37,607° longitude com elevação de 498 m (ponto A), e o ponto de entrega na cidade de Custódia - PE em 8,08748° de latitude e 37,643° de longitude, com elevação de 537 m, descrito pelo ponto B (Figura 18). Foram utilizadas imagens de uma base de dados de alta definição do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), com resolução de 30 m, que corresponde ao recobrimento aerofotogramétrico e perfilhamento a laser do estado de Pernambuco com coordenadas planimétricas e altimétricas, através de ortofotos na escala de 1:5.000 e Modelos Digitais de Terrenos (MDTS) e Modelos de Elevação (MDE), com cerca de 75 bilhões de pontos.

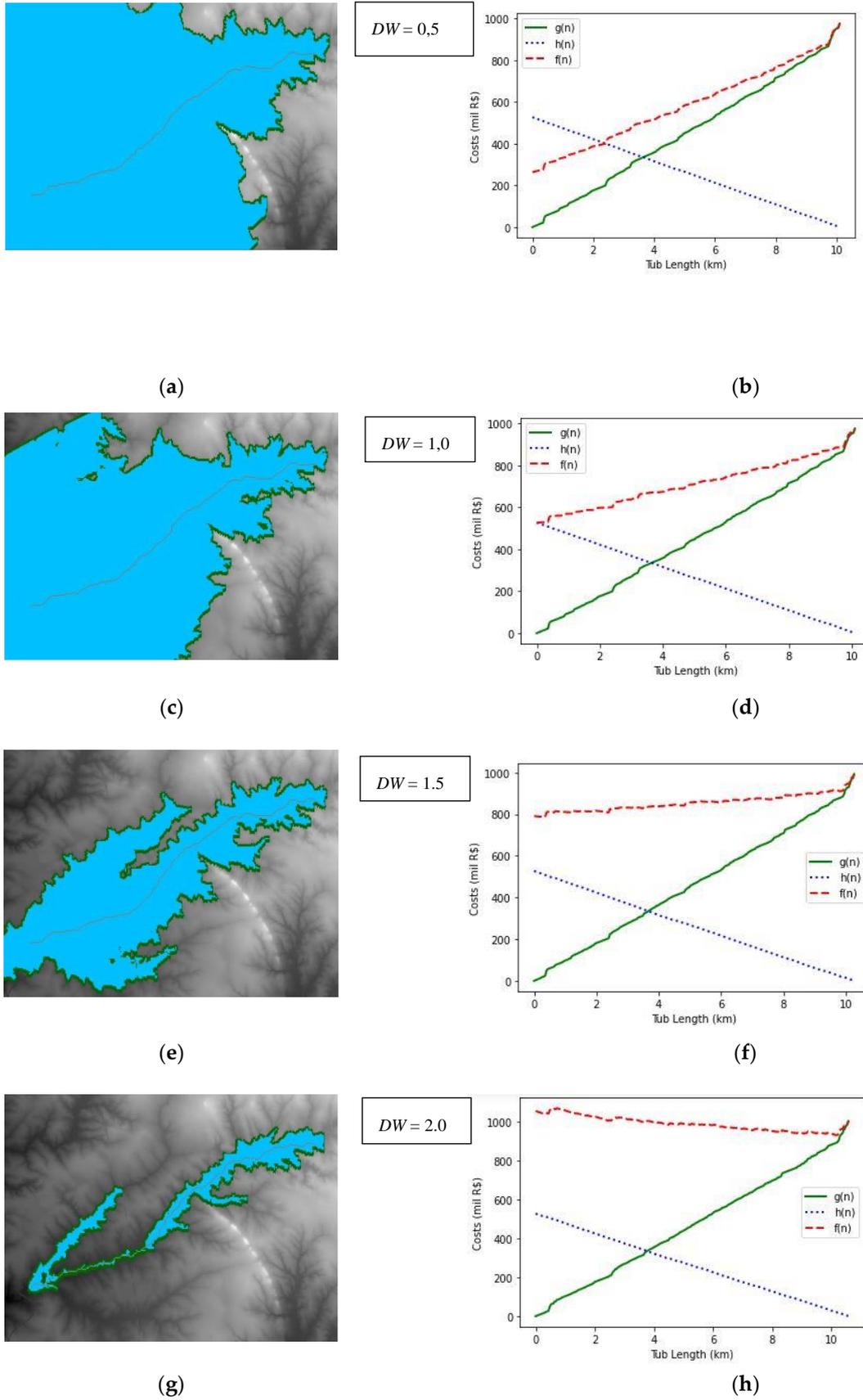
Figura 17 - Área de interesse da terceira aplicação

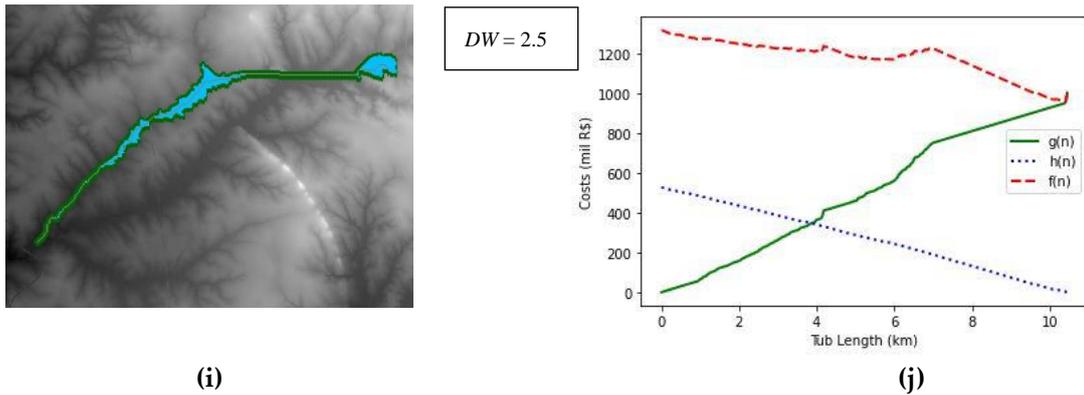


Fonte: O autor (2023).

Seguindo os mesmos passos da primeira aplicação, os testes do algoritmo foram realizados para diferentes valores de DW , ilustrados por meio da Figura 18. Assim como na primeira aplicação para valores crescentes de DW , há um aumento nos custos, percebido nas Figuras 18b), 18d), 18f), 18h) e 18j) abaixo:

Figura 18 - Resultados analíticos do comprimento da tubulação, em função da elevação da terceira aplicação





Fonte: O autor (2023).

Assim como na primeira aplicação, quando o valor de $DW = 0,5$, observa-se um aumento do tempo de processamento, cujo campo de busca é maior em relação aos demais valores utilizados. Valores de $DW \leq 0,5$ correspondem a custos constantes de R\$ 97.755. Quanto ao valor de $DW = 2,5$, ocorre uma mudança no traçado, mas apresentando um custo menor quando comparado ao anterior $DW = 2,0$. A Tabela 4 a seguir, demonstra os resultados analíticos das demais simulações:

Tabela 4 - Análise dos resultados da terceira aplicação

DW	Altura Manométrica (mca)	Tempo de processamento (hh:mm:ss)	Tamanho da tubulação (m)	Custo total (mil R\$)	Custo da energia elétrica (%)	Custo da tubulação (%)
0,5	49,33	0:16:12	10,097	979,755	46,14	53,86
1,0	49,33	0:11:51	10,097	979,755	46,14	53,86
1,5	49,44	0:03:50	10,267	989,697	45,79	54,21
2,0	49,66	0:00:30	10,574	1.007.699	45,16	54,84
2,5	49,57	0:00:05	10,448	1.000.345	45,41	54,59

Fonte: O autor (2023).

Conforme se vê na Tabela 4, o melhor resultado encontrado demanda a adoção de um coeficiente $DW = 1,0$, o que gera uma trajetória ótima, mesmo com um tempo de processamento igual a 11 minutos e 51 segundos. Embora preponderem custos com tubulação, a redução de custos totais medida com a escolha otimizada da rota é compensada pela redução dos custos energéticos ao longo de toda a vida útil do projeto.

A rota ideal calculada pelo algoritmo MAPR para as aplicações realizadas apresentam-se coerentes com aquelas que poderiam advir da concepção de um projetista que se deparasse com o problema posto. O uso do MAPR, exhibe a vantagem de descartar a subjetividade que, em algum grau, torna a qualidade do projeto muito dependente da experiência do projetista.

A coerência entre a rota ideal calculada e o que vislumbra a experiência prática é alcançada pelo MAPR, graças a representatividade das variáveis admitidas como suficientes

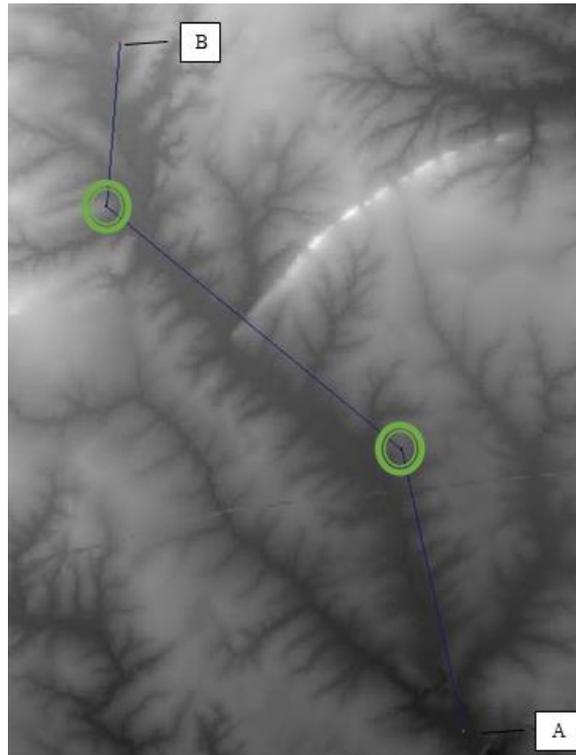
ao equacionamento do problema na forma de um modelo de otimização econômica, nos moldes propostos pelo algoritmo BAGDA; e a funcionalidade da dinâmica proposta, da qual advém cada decisão de deslocamento no domínio da despesa anual, e para a qual se busca encontrar o menor valor total para a rota emergente da referida dinâmica.

O coeficiente multiplicador, introduzido como modificador do algoritmo A*, apresenta a funcionalidade de ponderar a importância relativa à tendência da trajetória calculada em acelerar a aproximação ao ponto de entrega da água, em face de eventual aumento da despesa anualizada traduzida por $g(n)$. Uma variação sistemática desse coeficiente, alterando os valores de DW , abre caminho para otimização da rota calculada, uma vez que afeta diretamente a decisão de deslocamento em nível de célula.

4.4 Sugestões de caminhos

O MAPR foi programado para realizar buscas de rotas com base em sugestões ao longo do caminho, permitindo a inserção de pontos na superfície de estudo. Através da seleção desses pontos como referência, é possível descobrir novas rotas. Na Figura 19, podemos observar a seleção de dois pontos intermediários (marcados em verde) entre os pontos de captação (A) e entrega (B), utilizando a mesma superfície de teste da terceira aplicação.

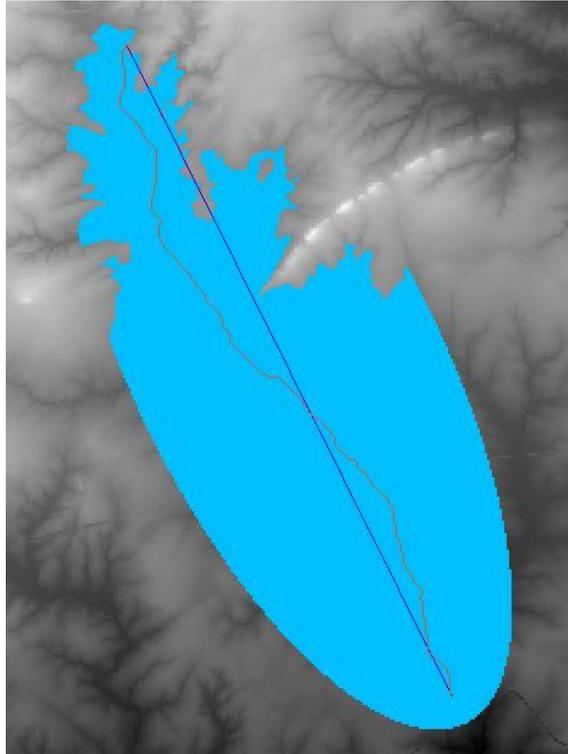
Figura 19 - Pontos sugeridos para o novo caminho



Fonte: O autor (2023).

Após a seleção dos pontos e os cálculos realizados pelo MAPR, utilizando um DW de 1,0, podemos observar na Figura 20 o resultado ótimo do traçado sugerido. É evidente que o caminho encontrado (indicado em laranja) é uma aproximação muito próxima do que foi sugerido anteriormente. A linha azul representa uma rota em linha reta que conecta os pontos A e B, servindo como uma referência para a distância mínima entre eles. A simulação foi concluída em um tempo total de 00:08:15, considerando uma adutora de 10.097 m, um custo total de R\$ 979,755 mil e uma altura manométrica de 49,33 mca.

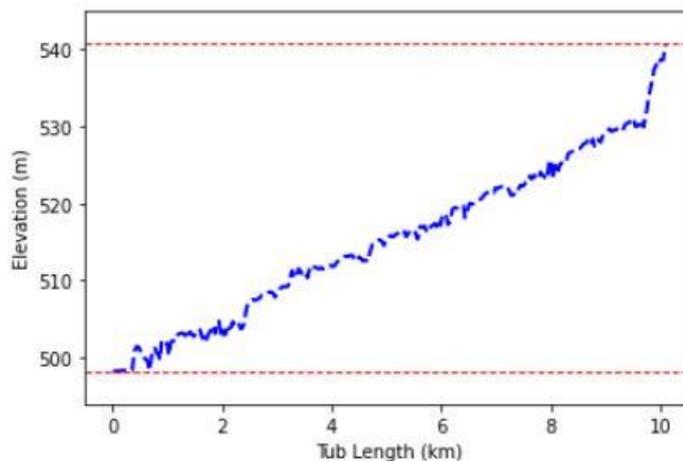
Figura 20 – Resultado ótimo do caminho sugerido



Fonte: O autor (2023).

Ao compararmos o desempenho do MAPR sem orientação (Figura 18c) com o MAPR com orientação (Figura 20), é observado uma redução no campo de busca das células, devido à introdução de uma direção durante a fase de pré-processamento. Isso resulta em uma diminuição significativa no tempo de processamento, de 00:03:36. O perfil de elevação ao longo do comprimento da tubulação é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Perfil de elevação



Fonte: O autor (2023).

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento e a aplicação do Algoritmo MAPR, resultou em avanços significativos na busca pelo traçado ótimo de adutoras, graças à eficiência do tempo de processamento da linguagem de programação *Python* orientada a objetos. Isso permite também sua integração com outros *softwares*, ampliando sua aplicação para além do ambiente acadêmico. Embora o algoritmo não assegure uma solução ótima global, as trajetórias calculadas são defensáveis do ponto de vista do projeto. Além disso, o algoritmo tem a vantagem de determinar automaticamente trajetórias com base na minimização dos custos de implantação e operação, o que o torna aplicável em uma variedade de relevos e topologias de adução.

O MAPR é apresentado também como um método de busca inovador, pois não leva em consideração a subjetividade da escolha de ponderação dos critérios, durante a fase de projeto. Também apresenta vantagem em relação aos *softwares* comerciais que utilizam *plugins*, que por muitas vezes, tendem a seguir um comportamento tendencioso na escolha do melhor traçado. Por exemplo, quando uma adutora é instalada ao lado das estradas, pode-se reduzir os custos imediatos de instalação. No entanto, é importante considerar que os custos de operação podem não ser sustentáveis a longo prazo.

Como sugestão para trabalhos futuros, é recomendado aprimorar o MAPR por meio de modificações contínuas em seu código, com o objetivo de reduzir o tempo de processamento. Além disso, é importante realizar comparações com outras metodologias adotadas, mas é necessário levar em consideração a topografia utilizada para obter resultados comparáveis, pois diferentes topologias podem gerar resultados inconsistentes para comparação. Seria benéfico desenvolver uma interface que permita a inserção das topografias e acompanhar os resultados em uma única janela, facilitando a visualização e análise dos dados. Por fim, é válido ressaltar que o MAPR possui a capacidade de ser integrado a outros *softwares*, como o QGIS e o ArcGIS, por meio de *plugins*, o que possibilita um desenvolvimento mais abrangente e flexível.

Por conseguinte, o algoritmo MAPR é uma ferramenta valiosa que pode ser aplicada em diferentes sistemas e projetos reais para auxiliar os projetistas.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, H.; AFSHAR, A.; JALALI, M. R. Ant-colony-based simulation–optimization modeling for the design of a forced water pipeline system considering the effects of dynamic pressures. **Journal of Hydroinformatics**, v. 12, n. 2, p. 212-224, 2010.
- ALBIERO D.; DOMINGUES DA SILVA. M. A.; MELO. R. P.; PONTIN GARCIA A.; CASTRO PRACIANO. A.; BELEM FERNANDES F. R.; DE ALMEIDA MONTEIRO L.; CHIODEROLI C. A.; OLIVEIRA DA SILVA A.; DELFINO BARBOSA FILHO J. A. Economic Feasibility of Underwater Adduction of Rivers for Metropolises in Semiarid Coastal Environments: Case Studies. **Water**, v. 10 n. 2 p. 215, 2018 DOI: 10.3390/w10020215.
- AMARAL, F. E.; CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A. 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**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 381-391, 2020.
- ARABI, M.; GHAREHHASSANLOO, S. Application and Comparison of Analytical Hierarchy Process (AHP) and Network Methods in Path Finding of Pipeline Water Transmission System, from Taleghan’s Dam to Hashtgerd New City, Tehran, Iran. **Open Access Library Journal**, v. 5, n. 4, p. 1-16, 2018.
- ASCE Task Committee to Rewrite Manual of Practice No. 46. Pipeline route selection for rural and cross-country pipelines, Committee on Pipeline Installation and Location. **ASCE**, Reston, Va, 1998.
- BABIKER, M. E. A.; ALHAG, S. M. Pipeline optimal path selection using geographic information systems. International Research Journal of Modernization. **Engineering Technology and Science**, v. 2 n. 10, 2020.
- BCRUA. Phase 2 Raw Water Delivery System under Development. 2022. Disponível em: <https://www.bcrua.org/bcrua-news-1/2022/08/03/phase2>. Acesso em: 09 de set. 2022.
- BERNAL P. M.; NESMACHNOW, S. A algorithm for GIS-based pipeline route selection in Veracruz, Mexico. 2020 International Conference on Mechatronics. **Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)**, 2020. DOI:10.1109/icmeae51770.2020.00018
- BEZERRA, S. de Tarso M.; CHEUNG, P. B. Perdas de água: tecnologias de controle. **João Pessoa: Editora da UFPB**, 2013.
- BLUM, C.; PUCHINGER, J.; RAIDL, G. R.; ROLI, A. Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 6, p. 4135-4151, 2011.
- CANDRA, A.; BUDIMAN, M. A.; POHAN, R. I. Application of A-Star Algorithm on Pathfinding Game. **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, p. 012047. 2021.
- CIRILO, J. A. Crise hídrica: desafios e superação. **Revista USP**, n. 106, p. 45-58, 2015.
- CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos avançados**, v. 22, p. 61-82, 2008.

COLLISCHONN, W.; PILAR, J. V. A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 14, n. 4, p. 397-406, 2000.

COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento. Governo do Estado garante execução da obra da adutora do Agreste. 2022. Disponível em: <https://servicos.compesa.com.br/governo-do-estado-garante-execucao-da-obra-da-adutora-do-agreste/>. Acesso em: 02 de set. 2022

COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento. Relatório Integrado de Administração. **Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos**, 2020.

CRUZ-CHÁVEZ, M. A.; MORENO-BERNAL, P.; RIVERA-LÓPEZ, R.; ÁVILA-MELGAR, E. Y.; MARTÍNEZ-BAHENA, B.; CRUZ-ROSALES, M. H. GIS Spatial Optimization for Corridor Alignment Using Simulated Annealing. **Applied Sciences** v. 10, n. 18, p. 6190, 2020. DOI: 10.3390/app10186190

DESALE, S. et al. Heuristic, and meta-heuristic algorithms and their relevance to the real world: a survey. **Int. J. Comput. Eng. Res. Trends**, v. 351, n. 5, p. 2349-7084, 2015.

DIJKSTRA, E. W. "A note on two problems in connection with graphs." **Numer Math.**, v.1, p. 269–271, 1959.

DO NASCIMENTO, R. F.; CANTERI, M. H. G.; KOVALESKI, J. L. Impacto dos sistemas de recompensas na motivação organizacional: revisão sistemática pelo método PRISMA. **Revista Gestão & Conexões**, v. 8, n. 2, p. 44-58, 2019.

DUCHONĚ, F. et al. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot. **Procedia Engineering**, v. 96, p. 59-69, 2014.

EBRAHIMPOOR, A.R.; ALIMOHAMADI, A.; ALESHEIKH, A. A.; AGHIGHI, H. Routing of Water Pipeline Using GIS and Genetic Algorithm. **Journal of Applied Sciences**, v. 9: p 4137-4145, 2009.

ENCE - GmbH. Hydraulic Calculations of Pipelines. 2018. Disponível em: <http://www.ence-pumps.ru/eng/truboprovody.php>. Acesso em: 07 de set. 2022.

ESRI. ESRI network analyst, Redlands, Calif, 2010.

FAISAL, M.; AHSAN, M. A. Optimization of Water Supply System using GIS: A Case Study of Lahore, Pakistan. **Journal of Geography and Geology**, v. 10, n. 3, p. 10-18, 2018.

FU, B. et al. An improved A* algorithm for the industrial robot path planning with high success rate and short length. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 106, p. 26-37, 2018.

GOMES, H. P. Economic Dimensioning of pipelines. **Environmental. Sanit. Eng.**, v. 6, p.108–114, 2001.

GOYAL, A. et al. Path finding: A* or dijkstra's? **International Journal in IT and Engineering**, v. 2, n. 1, p. 1-15, 2014.

HARDIN, D.; BRIDGES, G.; RUNDELL, D. Selecting the best pipeline route based on facts not feelings. **Pipelines 2008: Pipeline Asset Management: Maximizing Performance of our Pipeline Infrastructure**, p. 1-9. 2008.

HART, P. E.; NILSSON, N. J.; RAPHAEL, B. A Formal Basis for Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. **IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics**, v. 4, n. 2, p. 100-107, 1968.

HELLER, L.; PÁDUA, L. Water Supply for Human Consumption. **Editora da UFMG: Belo Horizonte, Brazil**, p. 620, ISBN 85-7041-516-8, 2006.

ITO, R. E.; TANAKA, S. S. Revisão sistemática de meta-heurísticas para flexible job shop scheduling problem (FJSSP). **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, [S.l.], v. 39, n. especial, p. 106-114, fev. 2023. ISSN 2596-2809. Disponível em: <<http://periodicos.unifil.br/index.php/Revistatestete/article/view/2807>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

IWA - International Water Association. Emergency response planning for water supply systems. 2014. Disponível em: <https://www.iwa-network.org/resource/emergency-response-planning-for-water-supply-systems/> Acesso em: 12 mar. 2023.

JAIN, V. et al. Water Pipeline Routing Using GIS. **Water Security and Sustainability**. Springer, Singapore, p. 101-111, 2021.

KALA, R.; SHUKLA, A.; TIWARI, R. Robotic path planning in static environment using hierarchical multi-neuron heuristic search and probability based fitness. **Neurocomputing**, v. 74, n. 14-15, p. 2314-2335, 2011.

KATHUO, P. W.; MUBEKA, K. Application of GIS Technologies in Optimal Routes Modelling of Water Utilities to Spur Development. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, ISSN (Online): p. 2319-7064, 2016.

KLUYVER, Thomas et al. Jupyter Notebooks a publishing format for reproducible computational workflows, 2016.

KOKASH, N. An introduction to heuristic algorithms. **Department of Informatics and Telecommunications**, p. 1-8, 2005.

KSL. Final Piece of Pipe Placed in Point of the Mountain Aqueduct. 2007. Disponível em: <https://www.ksl.com/article/1069196/final-piece-of-pipe-placed-in-point-of-the-mountain-aqueduct> Acesso em: 07 de set. 2022.

LIU, D. Research of the Path Finding Algorithm A* in Video Games. **Highlights in Science, Engineering and Technology**, [S. l.], v. 39, p. 763-768, 2023. DOI: 10.54097/hset.v39i.6642. Disponível em: <https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/6642>. Acesso em: 30 jun. 2023.

LIU, P. et al. Combined effects of climate and land management on watershed vegetation dynamics in an arid environment. **Science of the Total Environment**, v. 589, p. 73-88, 2017.

LIU, X.; GONG, D. A comparative study of A-star algorithms for search and rescue in perfect maze. **2011 international conference on electric information and control engineering. IEEE**, p. 24-27, 2011.

LUETTINGER, J.; CLARK, T. Geographic Information System-based Pipeline Route Selection Process. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 131, n. 3, p. 193-200, 2005. DOI: 10.1061/(asce)0733-9496(2005)131:3(193).

- MANZANO, J. A. N. G. Introdução à linguagem Python. **Novatec Editora**, 2018.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Ann. Braz. Acad. Sci.*, 2017.
- MAUGHN, S.; BYRNES, K. Challenges in Completing a Large Diameter Water Transmission Pipeline. **Pipelines** **2013**, 2013. DOI:10.1061/9780784413012.045
- MIRHASSANI, S. A.; AFSHAR, H. A. Optimal water pipeline routing considering pipeline failure probability and water demand. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 68, n. 2, p. 112-125, 2019.
- MOHAMMED, A. B.; MAJID, M. R. Design of Optimal Water Distribution Network using Geographic Information System in Yola Nigeria. **International Conference on Urban and Regional Planning**, 2014.
- NBR – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de adutora de água para abastecimento. **NBR 12.215**. Rio de Janeiro, 1997.
- PADOWSKI, J. C.; GORELICK, S. M. Corrigendum: Global analysis of urban surface water supply vulnerability. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 11, p. 119, 2014.
- PE3D. Governo do Estado de Pernambuco. Pernambuco Tridimensional, 2016.
- PERSSON, S. M.; SHARF, I. Sampling-based A* algorithm for robot path-planning. **The International Journal of Robotics Research**, v. 33, n. 13, p. 1683-1708, 2014.
- RANA, K.; ZAVERI, M. A-star algorithm for energy efficient routing in wireless sensor network. **Trends in Network and Communications**, p. 232-241, 2011.
- RENDON, R. A. G.; ZULUAGA, A. H. E.; OCAMPO, E. M. T. Técnicas metaheurísticas de optimización. Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- ROTT, B. Rethinking Heuristics—Characterizations and Examples, **Problem Solving**, p. 176, 2014.
- ROY, P.; CHANDRAMOHAN, J.; VINOD KUMAR, K.; RAJ, A.; SHAIK, M.; BOTHALE, V.; DIWAKAR, P. G. Use of Remote Sensing and Geospatial Technique for Pre-feasibility Analysis of Rural Water Pipeline Grids, **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 45, n. 4, p. 667–672, 2016. DOI:10.1007/s12524-016-0631-0
- SAATY, T. L. “Método de Análise Hierárquica”, Tradução de Wainer da Silveira e Silva, McGraw Hill, Makron, São Paulo, 1991.
- SALAH, A. M.; ATWOOD, D. Pipeline Alignment Optimization: Automated GIS-Based Approach, **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 2, n.1, p. 2–13, 2011. DOI:10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000067.
- SANTOS, J. R.; SILVA, E. S.; FRANÇA, K. V. S.; ALMEIDA, L. A. S.; PEREIRA, R. C. M. Analysis of the efficiency of water supply systems in rural areas of Paraíba, Brazil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 3, p. 421-428, 2018.
- SARMENTO, F. J. “Engenharia Civil e Ambiental – Uma abordagem computacional: Tópicos de Inteligência Artificial”. **Edições Kindle**, v. 5, 2022b.

SARMENTO, F. J. Automatic Routing of Water Supply Pipelines, **Brazilian Journal of Water Resources (RBRH)**, v. 27, 2022a.

SARMENTO, F. J. Um Algoritmo Metaheurístico de Apoio à Otimização Para o Traçado de Adutoras, **Anais do XI Simpósio de Recurso Hídricos do Nordeste**. João Pessoa: SRHNE, 2012.

SHUKLA, P. C.; RADADIYA, B. Usage of GIS, GPS and Remote Sensing Data to identify effective and optimum route of development projects like Road, Train and Canal for better governance implementation. **Indian Journal of applied Research**, 2013.

SILVA, E. R.; CIRILO, J. A.; DANTAS, Y. M. Multicriteria Analysis Based on Models for the Water Resources Management in Pernambuco. **World Water Congress**, Porto de Galinhas, Ipojuca, PE. XIV World Water Congress, 2011.

SIMON, L.; JAPHETH, N. K.; MOHAMMED, U. Selection of the Shortest Route of Transporting Water from Yola Water Service Station to Yolde Pate, Adamawa State, **Journal of Research in Environmental and Earth Sciences**, v. 7, n. 1, p. 76-85, 2021. ISSN(Online):2348-2532.

SIREGAR, B. et al. Food delivery system with the utilization of vehicle using geographical information system (GIS) and a star algorithm. **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, p. 012038, 2017.

SULEIMAN, S. A. N. I. et al. Optimal Route Location by Least Cost Path (LCP): Analysis using (GIS), A Case Study. **International Journal of Scientific Engineering and Technology Research**, v. 4, n. 44, p. 9621-9626, 2015.

SURV, U.; SHU'AIBU; BABAYO, A. Application of Geospatial Techniques. **Water Distribution Management**, Bauchi Metropolis (Nigeria), v. 15, n. 4, 2019. ISSN: 1896-6783

TANG, G.; TANG, C.; CLARAMUNT, C.; HU, X.; ZHOU, P. 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. doi:10.1109/access.2021.3070054.

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de Água. 2ª ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

TUCCI, C. E. M. Urbanization and Water Resources. **Waters of Brazil**. Springer, Cham, p. 89-104, 2016.

UNDESA. International decade for action “Water for life” 2005–2015. Disponível em: www.un.org/waterforlifedecade/scarcity.shtml, Acesso: 28 março de 2019, 2016.

URRUTIA, G.; BONFILL, X. PRISMA declaration: a proposal to improve the publication of systematic reviews and meta-analyses. **Medicina clínica**, v. 135, n. 11, p. 507-511, 2010.

VERDAGUER, M. et al. Optimal fresh water blending: A methodological approach to improve the resilience of water supply systems. **Science of The Total Environment**, v. 624, p. 1308–1315, 2017.

WANG, X. et al. A survey of welding robot intelligent path optimization. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 63, p. 14-23, 2021.

WHO - World Health Organization. Drinking-water. 2019. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>, Acesso: 12 mar. 2023.

WWAP - United Nations World Water Assessment Programme. Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2018: soluções baseadas na natureza para a gestão da água. Paris, UNESCO, 2018.

ZHANG, X.; WU, C.; LIU, X. Optimization design of water supply pipeline based on particle swarm optimization algorithm. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 10, n.1, p. 04018037, 2019.

ZHAO, X. et al. The Application of Adaptive A-star Algorithm in Layout of Spatial Pipeline. **2020 IEEE 9th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)**. IEEE. p. 272-277, 2020.

ZIDANE, I. M.; IBRAHIM, K. Wavefront and A-Star Algorithms for Mobile Robot Path Planning. **Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics 2017. AISI 2017**. Advances in Intelligent Systems and Computing, v. 639. Springer, Cham. 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64861-3_7.